



Carlos Leonel Farinha Guerreiro
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Avaliação de emissões de
nanopartículas resultantes de
processos de soldadura por fusão em
aços**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
(UNL/FCT,DEMI)

Co-orientador: Prof. Doutor João Fernando Pereira
Gomes
(IPL/ISEL,ADEQ)

Presidente:	Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente:	Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Vogais:	Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
	Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes

Copyright

Avaliação de emissões de nanopartículas resultantes de processos de soldadura por fusão em aços.

©Carlos Leonel Farinha Guerreiro, FCT-UNL, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível, com a colaboração de várias pessoas, às quais dirijo os meus mais sinceros agradecimentos.

À minha orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, os meus mais sinceros agradecimentos pela disponibilidade e apoio incansável, no decorrer deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor João Gomes, agradeço igualmente a ajuda prestada e o acompanhamento em vários domínios desta dissertação.

À Professora Doutora Teresa Vieira e à Eng^a Rita Santos da Universidade de Coimbra, agradeço, todo o apoio na avaliação das nanopartículas.

À Professora Doutora Patrícia Carvalho do Microlab do IST, agradeço a disponibilidade e ajuda prestada na análise TEM e de EDS.

Ao Professor Doutor Pamies Teixeira, agradeço o apoio imprescindível e interesse demonstrado na realização deste trabalho.

Ao Eng. Pedro Rodrigues da Codimetal, o meu agradecimento pela disponibilidade para a análise química do material base.

Ao Eng. João Gonzalez o meu agradecimento pela ajuda prestada.

Aos Srs. António Campos e Paulo Magalhães, um agradecimento por toda a sua assistência técnica e tempo despendido neste trabalho.

Ao meu colega Daniel Lavrador, agradeço toda a ajuda prestada ao longo deste trabalho, principalmente, durante a concepção da mesa de soldadura.

À minha família, agradeço de modo especial, pois também contribuíram para a conclusão deste trabalho e em particular à minha mãe que me ajudou directamente na construção da mesa de soldadura.

Agradeço também às seguintes instituições:

À Air Liquid, Sociedade Portuguesa do Ar Líquido, Arlíquido Lda.

À Codimetal Industries, S.A.

Ao Microlab, Electron Microscopy Laboratory (ICEM/IST).

RESUMO

Os processos de soldadura por fusão originam fumos que contêm nanopartículas, no entanto, não se conhece uma relação entre os parâmetros de soldadura e a libertação destas partículas. Dos processos de soldadura mais comuns na indústria existem dois bastante difundidos: a soldadura MAG e a soldadura por eléctrodos revestidos, sendo assim importante o estudo destes dois processos.

Os principais objectivos deste estudo foram: a análise de partículas libertadas durante estes processos, a caracterização das partículas em função da concentração e da composição e a correlação destas com as condições operatórias de soldadura.

Foram realizados ensaios com diferentes parâmetros de soldadura para os dois processos, tendo sido quantificadas as emissões de nanopartículas recolhidas e caracterizadas por microscopia electrónica de varrimento.

Para os processos de soldadura por eléctrodos revestidos (SER) e *Metal Active Gas* (MAG) verificou-se a existência de nanopartículas com elevada capacidade de deposição nos alvéolos pulmonares, podendo provocar uma diminuição da capacidade respiratória dos soldadores e de outro pessoal técnico envolvido nas operações de soldadura.

Estudos desta natureza possibilitam a determinação das áreas superficiais alveolares de nanopartículas depositadas, concentrações, morfologia e composição resultantes de diferentes condições processuais.

PALAVRAS-CHAVE

Nanopartículas

Soldadura por Fusão

Metal Active Gas (MAG)

Soldadura por Eléctrodos Revestidos (SER)

Geração de fumos

ABSTRACT

Fusion welding processes generate fumes that contain nanoparticles, however it is not known a relationship between the welding parameters and the emitted nanoparticles.

From the most common welding processes in the industry there are two more widespread, the shielded metal arc and the active metal arc welding. Therefore it is important to study these two processes.

The main objectives of this study were the analyses of released particles from these processes, the characterization of the particles by concentration and composition and the correlation between the operating conditions of the welding processes.

Welding tests were performed using different welding parameters, quantifying nanoparticle emissions. Nanoparticles were also collected and characterized by transmission electron microscopy.

In this study, which covered two welding processes Shielded Metal Arc Welding (SMAW) and (Metal Active Gas) MAG, it was possible to determine the existence of nanoparticles having a high deposition rate in the alveolar tract, possibly causing a decrease on the respiratory capacity of welders as other technical personal involved in welding operations.

Studies such as this enable the determination of the alveolar surface area of nanoparticles deposited, concentration, morphology and composition resulting from various process conditions.

KEY-WORDS

Nanoparticles

Fusion welding

Metal Active Gas (MAG)

Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Fume generation

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
NOMENCLATURA	xiii
Nomenclatura Romana.....	xiii
Nomenclatura Grega	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivos	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	3
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1 Arco Eléctrico	5
2.2 Caracterização do processo de soldadura SER.....	8
2.2.1 Eléctrodos revestidos.....	9
2.2.2 Equipamentos do processo de soldadura SER	11
2.3 Caracterização do Processo de soldadura MAG	12
2.3.1 Equipamento do processo de soldadura MAG	13
2.3.2 Gases de Protecção do processo de soldadura MAG	14
2.3.3 Modos de transferência do processo de soldadura MAG.....	14
2.4 Emissão de fumos na soldadura por fusão	16
2.4.1 Nanopartículas.....	17
2.5 Sistemas de remoção	22
2.6 Conclusão.....	23
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1 Introdução	25
3.2 Objectivos	25
3.3 Automatização do processo de soldadura MAG	26
3.3.1 Principais requisitos:	26
3.3.2 Planeamento da construção	26

3.3.3	Estrutura da Mesa de soldar	28
3.3.4	Adaptação da máquina de soldar.....	31
3.3.5	Controladores da mesa	32
3.3.6	<i>Software</i> de controlo da mesa.....	33
3.3.7	Validação da mesa de soldadura	34
3.4	Materiais.....	35
3.5	Equipamentos utilizados	36
3.5.1	Máquina de soldar ProMig 501 da Kemppi	36
3.5.2	Monitor de área de superfície de nanopartículas.....	36
3.5.3	Amostrador de aerossóis nanométricos	37
3.5.4	Equipamento de medição de granulometria SMPS	38
3.5.5	Microscópio electrónico de transmissão	39
3.6	Procedimento experimental para processo de soldadura MAG	40
3.6.1	Ensaio experimentais do processo de soldadura MAG.....	41
3.6.2	Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas	42
3.6.3	Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise em microscopia electrónica.....	43
3.6.4	Recolha de amostras para medição no SMPS.	44
3.7	Procedimento experimental para o processo de soldadura SER	45
3.7.1	Caracterização dos eléctrodos utilizados.....	45
3.7.2	Ensaio experimentais do processo de soldadura SER	46
3.7.3	Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas.....	46
3.7.4	Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise de microscopia.....	48
3.8	Conclusões	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Introdução	49
4.2	Objectivos	49
4.3	Cálculo das entregas térmicas	50
4.4	Resultados do NSAM no processo de soldadura MAG	51
4.4.1	Ensaio 1	52
4.4.2	Ensaio 2	54
4.4.3	Ensaio 3	56
4.4.4	Ensaio 4.....	59
4.4.5	Discussão dos resultados do NSAM no processo de soldadura MAG	62

4.5	Resultados do NSAM no processo de soldadura SER	63
4.5.1	Ensaio 1	63
4.5.2	Ensaio 2	65
4.5.3	Ensaio 3	68
1.1.1	Ensaio 4	70
1.1.2	Discussão dos resultados do NSAM no processo de soldadura SER	73
4.6	Resultados de granulometria do SMPS no processo de soldadura MAG.....	74
4.6.1	Ensaio 1	74
4.6.2	Ensaio 2	75
4.6.3	Ensaio 3	76
4.6.4	Ensaio 4	77
4.6.5	Discussão dos resultados de SMPS	78
4.7	Resultados da análise por microscopia.....	79
4.7.1	Resultados da análise química do processo de soldadura MAG	79
4.7.2	Resultados da análise morfológica do processo de soldadura MAG.....	80
4.7.3	Resultados da análise química do processo de soldadura SER	82
4.7.4	Resultados da análise morfológica do processo de soldadura SER.....	83
5.	CONCLUSÕES.....	85
	BIBLIOGRAFIA.....	87
	ANEXOS.....	i
A1.	Desenhos técnicos da mesa de soldar	ii
A1.1	Estrutura da mesa de soldar.....	ii
A1.2	Suporte do motor	iii
A1.3	Braço de suporte da tocha de soldadura	iv
A1.4	Chapa de apoio da tocha de soldadura	v
A1.5	Anilha com saliência e barra de fixação da tocha de soldadura	vi
A2.	Manual de utilização da mesa de soldar	vii
A2.1	Introdução.....	vii
A2.2	Lista de componentes	vii
A2.3	Preparação dos componentes.....	vii
A2.4	<i>Software</i> e interface	x
A2.5	Colocação da tocha na máquina de soldar	xi

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Forças que actuam na transferência. Figura adaptada [12].....	7
Figura 2.2: Princípio de funcionamento SER. Imagem adaptada de [13].....	8
Figura 2.3: Eléctrodo revestido. Figura adaptada [15].....	9
Figura 2.4: Equipamento SER. Imagem adaptada [16].....	11
Figura 2.5: Princípio de funcionamento MAG Figura adaptada [17].	13
Figura 2.6: Ilustração de equipamento MAG. Figura adaptada [18].....	14
Figura 2.7: Modo de transferência por curto-circuito [19].....	15
Figura 2.8: Modo de transferência Globular [19].....	16
Figura 2.9: Modelo das diversas regiões do pulmão humano. Figura adaptada [9].....	21
Figura 2.10: Curvas de deposição na região traqueobrônquial e alveolar do pulmão. Figura adaptada [9].....	21
Figura 3.1: Guia Linear [25]	27
Figura 3.2: Motor passo a passo [26]	27
Figura 3.3: Controlador do motor [27].....	27
Figura 3.4: NI-Compact DAQ [28].....	27
Figura 3.5: Módulo 9401 [29].....	27
Figura 3.6: Módulo 9474 [30].....	28
Figura 3.7: Máquina de soldar ProMig 501	28
Figura 3.8: Estrutura de suporte da guia.	28
Figura 3.9: Imagens do suporte e motor.....	29
Figura 3.10: Mesa de soldar com Suporte do motor e motor fixados na Guia.....	29
Figura 3.11: Fixação da tocha.	30
Figura 3.12: Mesa de soldar com calha de fixação da manta corta-fogo.	31
Figura 3.13: Mesa de soldar com todos os elementos.....	31
Figura 3.14: Tocha MIG/MAG MMT42 [31].	32
Figura 3.15: Painel frontal da máquina de soldar.....	32
Figura 3.16: Onda quadrada do motor passo a passo	33
Figura 3.17: Interface LabView	33
Figura 3.18: Cordões de soldadura.....	35
Figura 3.19: NSAM, monitor de área de superfície de nanopartículas	37
Figura 3.20: Esquema de funcionamento do NSAM [35].....	37
Figura 3.21: Amostrador de aerossóis nanométrico	38
Figura 3.22: SMPS [39]	39
Figura 3.23: Microscópio electrónico de transmissão Hitachi H-8100 II	40
Figura 3.24: Esquema de pontos de recolha para o monitor de área de superfície de nanopartículas.	43
Figura 3.25: Grelha de cobre no NAS.....	44
Figura 3.26: Esquema de tomada de amostras do NAS	44
Figura 3.27: Esquema de tomada de amostras do SMPS	45
Figura 3.28: Esquema de pontos de amostragem do NSAM em SER	47
Figura 4.1: Ensaio 1, transferência globular com mistura gasosa Ar+18% CO ₂ a 50 cm, 100 cm e 300 cm.....	52
Figura 4.2: Ensaio 1, transferência globular com mistura gasosa Ar+18% CO ₂ na <i>hotte</i> e máscara do operador.....	52

Figura 4.3: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 1.....	53
Figura 4.4: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 1	54
Figura 4.5: Ensaio 2, transferência globular com mistura gasosa Ar+8% CO ₂ a 50 cm, 100 cm e 300 cm.....	54
Figura 4.6: Ensaio 2, transferência globular com mistura gasosa Ar+8% CO ₂ na <i>hotte</i> e máscara do operador.....	55
Figura 4.7: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 2.....	55
Figura 4.8: Média de todos os pontos de amostragem Ensaio 2	56
Figura 4.9: Ensaio 3, transferência <i>spray</i> com mistura gasosa Ar+18 % CO ₂ a 50 cm, 100 cm e 300 cm.....	57
Figura 4.10: Ensaio 3, transferência <i>spray</i> com mistura gasosa Ar+18 % CO ₂ na <i>hotte</i> e máscara do operador.....	57
Figura 4.11: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 3.....	58
Figura 4.12: Média de todos os pontos de amostragem Ensaio 3	59
Figura 4.13: Ensaio 4, transferência <i>spray</i> com mistura gasosa Ar+8 % CO ₂ a 50 cm, 100 cm e 300 cm.....	60
Figura 4.14: Ensaio 4, transferência <i>spray</i> com mistura gasosa AR+8 % CO ₂ na <i>hotte</i> e máscara do operador.....	60
Figura 4.15: Medição com NSAM no ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 4.....	61
Figura 4.16: Média de todos os pontos de amostragem do ensaio 4.....	61
Figura 4.17: Eléctrodo Rutílico 70 A a 50 cm, 100 cm, 300 cm.....	63
Figura 4.18: Eléctrodo Rutílico 70 A no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na <i>hotte</i>	64
Figura 4.19: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 1.....	64
Figura 4.20: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 1	65
Figura 4.21: Eléctrodo Rutílico 90 A a 50 cm, 100 cm, 300 cm.....	66
Figura 4.22: Eléctrodo Rutílico 90 (A) no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na <i>hotte</i>	66
Figura 4.23: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 2.....	67
Figura 4.24: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 2.	67
Figura 4.25: Eléctrodo Básico 70 A a 50 cm, 100 cm, 300 cm.....	68
Figura 4.26: Eléctrodo Básico 70 (A) no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na <i>hotte</i>	69
Figura 4.27: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 3.....	69
Figura 4.28: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 3	70
Figura 4.29: Eléctrodo Básico 90 (A) a 50 cm, 100 cm, 300 cm.....	71
Figura 4.30: Eléctrodo Básico 90 (A) no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na <i>hotte</i>	71
Figura 4.31: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 4.....	72
Figura 4.32: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 4.	73

Figura 4.33: Resultados SMPS Ensaio 1.....	75
Figura 4.34: Resultados SMPS Ensaio2.....	76
Figura 4.35: Resultados SMPS Ensaio 3.....	77
Figura 4.36: Resultados SMPS Ensaio 4.....	78
Figura 4.37: Análise EDS da mistura gasosa Ar+18 % CO ₂	79
Figura 4.38: Análise EDS da mistura gasosa Ar+8 % CO ₂	80
Figura 4.39: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG com mistura gasosa Ar+18 % CO ₂ ,.....	81
Figura 4.40: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG com mistura gasosa Ar+8 % CO ₂ ,.....	81
Figura 4.41: Análise EDS, Eléctrodos básicos.....	82
Figura 4.42: Análise EDS, Eléctrodos Rutilícos	83
Figura 4.43: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura SER com eléctrodos Rutilícos,	84
Figura 4.44: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura SER com eléctrodos Básicos,	84
Figura A1: Desenho técnico da estrutura da mesa de soldar.....	ii
Figura A2: Desenho técnico do suporte do motor.....	iii
Figura A3: Desenho técnico do braço de suporte da tocha	iv
Figura A4: Desenho técnico da chapa de apoio da tocha de soldadura.....	v
Figura A5: Desenhos técnicos de anilha e barra de fixação da tocha de soldadura	vi
Figura A6: Ilustração de cDAQ-9178	viii
Figura A7: Módulo NI 9474.....	viii
Figura A8: Módulo 9401.....	ix
Figura A9: Módulo de controlo do motor	ix
Figura A10: Ambiente do interface do controlo da mesa	xi
Figura A11: Montagem da tocha de soldadura no suporte.....	xi

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros de Soldadura.	8
Tabela 2.2: Funções do revestimento [11, 14].	9
Tabela 2.3: Classificação do revestimento SER [11].	10
Tabela 2.4: Descrição dos equipamentos SER [14]	12
Tabela 2.5: Parâmetros de soldadura [11]	13
Tabela 2.6: Fumos de soldadura e efeitos na saúde [21, 22].	17
Tabela 2.7: Processos e potenciais fontes de emissão de nanopartículas [24].	19
Tabela 3.1: Principais características dos equipamentos.....	27
Tabela 3.2: Composição química do material base (% em peso).....	35
Tabela 3.3: Composição química ER 70S-6 (% em peso) [32].....	35
Tabela 3.4: Composição química do material depositado do eléctrodo E6013 (% em peso) [33].	35
Tabela 3.5: Composição química do material depositado do eléctrodo E7018 (% em peso) [34].	36
Tabela 3.6: Soldadura MAG, Fio sólido com protecção gasosa activa.	41

Tabela 3.7: Ensaios experimentais do processo de soldadura MAG.....	41
Tabela 3.8: Parâmetros do Processo de soldadura por eléctrodos revestidos.....	46
Tabela 3.9: Ensaios experimentais do processo de soldadura SER.....	46
Tabela 4.1: Entrega térmica no processo de soldadura MAG	51
Tabela 4.2: Entrega Térmica no processo de soldadura SER.....	51

NOMENCLATURA

Nomenclatura Romana

a	Região alveolar
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists.</i> (Conferência dos Higienistas Governamentais Industriais Americanos)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldadura)
CPC	Contador de partículas condensadas
d	Diâmetro da partícula
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DMA	<i>Differential Mobility Size Analyzer</i> (Analisador de tamanhos por mobilidade eléctrica)
EDS	<i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i> (Espectrometria de dispersão de energia de raios-X)
ER	Eléctrodo revestido
FCT UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
FCT-UC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i> (Alta eficiência para partículas no ar)
I	Fracção de partículas inaláveis
I _c	Intensidade de corrente
ICEM	Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais
ICRP	<i>International Commission of Radiological Protection</i> (Comissão Internacional de Protecção Radiológica)
IIW	<i>International Institute of Welding</i> (Instituto Internacional de Soldadura)
IST	Instituto Superior Técnico
K	Constante de Boltzman
MAG	<i>Metal active gas</i> (Metal gás activo)
MIG	<i>Metal inert gas</i> (Metal gás inerte)
NAS	<i>Nanometer Aerosol Sampler</i> (Amostrador de aerossóis nanométricos)
NI	National Instruments
NSAM	<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i> (Monitor de área de superfície de nanopartículas)
SER	Soldadura por eléctrodos revestidos
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (Soldadura por arco eléctrico)
SMPS	<i>Scanning Mobility Particle Sizer</i> (Analisador de partículas por mobilidade)
T	Temperatura
TB	Região traqueobrônquial
TEM	<i>Transmission electron microscopy</i> (Microscópio electrónico de transmissão)
TSI	TSI-Trust Science Innovation, Inc.
US EPA	Agência Federal Americana de Protecção Ambiental

Nomenclatura

v	Velocidade de soldadura
V_a	Queda de voltagem no ânodo
V_t	Tensão de arco
A_e	Área de secção do eléctrodo
D_a	Eficiência de deposição na região alveolar
D_{HA}	Eficiência de deposição de partículas na região do nariz
D_{TB}	Eficiência de deposição na região traqueobrônquial
F_{em}	Força electromagnética
F_g	Força da gravidade
F_s	Força de arrastamento do plasma
F_γ	Tensão superficial
l_s	Comprimento da soldadura
t_s	Tempo de arco
e	Carga do electrão
l	Extensão do eléctrodo

Nomenclatura Grega

η	Rendimento do processo
ρ	Resistência média do eléctrodo
ϕ	Função de trabalho do eléctrodo

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A soldadura por fusão é o principal processo de ligação utilizado na indústria [1]. Na Europa existem cerca de 730000 soldadores a tempo inteiro e aproximadamente 5,5 milhões de trabalhos relacionados com a soldadura [2]. De entre os processos de soldadura por fusão existentes, os mais comuns são os processos de soldadura por arco eléctrico [3], dos quais se destacam o processo de soldadura por eléctrodos revestidos (SER) e o processo de soldadura por fio sólido com protecção gasosa activa (MAG).

Tanto o processo de soldadura SER como o processo de soldadura MAG caracterizam-se por serem processos onde a fusão do material de adição e do material base é obtida através do calor desenvolvido por um arco eléctrico. Em ambos os processos existe uma protecção gasosa para o banho de soldadura. No processo de soldadura SER esta protecção é obtida pela decomposição do revestimento do eléctrodo, enquanto no processo de soldadura MAG se utiliza uma mistura gasosa. Outra característica que distingue estes dois processos é o material de adição, que no processo de soldadura SER é o próprio eléctrodo que serve de material de adição, enquanto no processo de soldadura MAG o material de adição é um fio sólido que é alimentado automaticamente.

Estes dois processos de soldadura geram fumos que contêm nanopartículas, no entanto as consequências na saúde dos operadores e indivíduos que se encontram expostos às nanopartículas libertadas por estes processos industriais são desconhecidas [4-6]. Contudo, os custos associados aos problemas de saúde que as nanopartículas provocam são avultados, sendo esta mais uma razão da grande importância para a realização deste estudo.

Em relação à geração de fumos existem correlações directas entre os parâmetros de soldadura, gases de protecção e material base a soldar, com a formação de fumos [1, 5, 7], no entanto não existem estudos sobre nanopartículas nestes processos.

Os fumos gerados nos processos de soldadura têm impacto na saúde dos soldadores e a composição química e morfológica destes fumos é também um factor importante e é influenciado directamente pelos parâmetros e condições de soldadura como eléctrodos, gases de protecção e material base a soldar [8].

1.2 Motivação

Os estudos já realizados são insuficientes. Foi apenas possível determinar a massa de nanopartículas, a sua concentração e estabelecer relações para avaliar a sua capacidade de deposição nos pulmões [4] em situações industriais e laboratoriais. No entanto, estudos posteriores têm demonstrado que a concentração e a massa das nanopartículas pode não ter correlação directa com os seus efeitos na saúde. De acordo com estes estudos a área superficial das nanopartículas é a característica mais relevante no impacto da saúde, é a área de superfície das partículas que vai condicionar onde estas se vão depositar sendo que, das possíveis regiões de deposição, as que mais interesse suscitam são o nariz (cabeça), devido à possibilidade de transferência de nanopartículas para o cérebro e a região traqueobrônquial e alveolar [9, 10]. As novas tecnologias agora disponíveis permitem a obtenção de novos dados, que até agora, não tinham sido estudados.

1.3 Objectivos

O presente trabalho teve como objectivos:

- Definir condições operacionais de soldadura para os processos SER e MAG que se aproximem de condições existentes no meio industrial.
- Analisar as partículas libertadas durante estes processos, nomeadamente nanopartículas.

- Caracterizar as partículas em função da sua concentração e composição.
- Correlacionar estas características com as condições operatórias de soldadura

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação estrutura-se em:

1. Introdução: Na introdução é descrito o enquadramento, a motivação e os objectivos da dissertação.
2. Estado de arte: Neste capítulo caracterizam-se os processos de soldadura MAG e SER, o arco eléctrico e ainda as emissões de nanopartículas.
3. Procedimento experimental: Descreve os parâmetros e as condições de soldadura adoptadas, a metodologia de recolha de fumos, e as análises efectuadas.
4. Resultados e discussão: Analisam-se criticamente os resultados.
5. Conclusões: Neste capítulo são expostas as conclusões retiradas do trabalho realizado e apontam-se algumas recomendações para trabalhos futuros.
6. Bibliografia.

2. ESTADO DE ARTE

2.1 Arco Eléctrico

Pode definir-se um arco eléctrico como um condutor gasoso no qual se transforma energia eléctrica em energia calorífica.

Através de uma descarga eléctrica estabelece-se um arco eléctrico que é mantido por um condutor gasoso. Os eléctrodos, através dos quais é estabelecido o circuito eléctrico, em soldadura, são em carvão ou metal. O eléctrodo negativo a partir do qual são emitidos electrões que passam através do gás é designado por cátodo e o eléctrodo positivo por ânodo. O deslocamento dos electrões do cátodo para o ânodo é o resultado da diferença de potencial [11].

No arco eléctrico designam-se as diferentes zonas por:

- Zona de queda de tensão catódica, junto ao cátodo
- Zona de queda de tensão anódica, junto ao ânodo
- Coluna de arco ou plasma de arco, zona central do arco

As partículas num arco eléctrico possuem movimentos distintos: os electrões partem do cátodo e vão bombardear o ânodo, os iões positivos tornam na direcção do cátodo e os iões negativos como os de oxigénio movimentam-se na direcção do ânodo.

A coluna de arco é electricamente neutra, pois a carga dos electrões e iões positivos por unidade de volume é aproximadamente igual e por os electrões dirigirem-se para o ânodo enquanto os iões positivos dirigem-se para o cátodo [11].

Na queda de tensão catódica identificam-se os seguintes mecanismos.

1. Emissão térmica
2. Emissão plasmogénica
3. Emissão de campo

A emissão térmica é caracterizada pela ocorrência de uma mancha catódica mal definida e por uma densidade de corrente baixa que ocorre nos eléctrodos não consumíveis de tungsténio.

O segundo mecanismo é associado a valores de densidade de corrente de 10^4 a 10^7 A/cm² e é caracterizada por uma mancha catódica estacionária e uma contracção marcada na zona da coluna de arco imediatamente adjacente ao cátodo. Este mecanismo ocorre em arcos de baixa corrente e elevada pressão como no processo de soldadura por plasma.

A emissão de campo indica que a mancha catódica é bem definida mas não estacionária, movendo-se com velocidades da ordem de 10^4 cm/s. A densidade de corrente varia entre os 10^5 e 10^8 A/cm². Este tipo de mecanismo predomina em soldadura com eléctrodos consumíveis [11].

Nos processos de soldadura por fusão utilizam-se dois tipos de corrente: alterna e contínua. A utilização de corrente contínua em relação à corrente alterna, tem algumas vantagens como: a ocorrência de um arco mais estável devido à ausência do problema do reescorvamento do arco todos os meios ciclos, uma vez que a polaridade é constante, uma transferência de metal mais fácil e regular através do arco. Por outro lado a corrente alterna evita problemas de sopro magnético e permite a utilização de equipamentos mais baratos.

A soldadura com polaridade inversa é utilizada, por exemplo, no processo MIG/MAG e é caracterizada em relação à polaridade directa, por permitir uma transferência de metal através do arco mais uniforme, de maior frequência e melhor dirigida, originar um efeito de limpeza da camada superficial de óxidos da peça devido à mesa funcionar como cátodo e originar uma densidade de energia mais reduzida [11].

No arco eléctrico os efeitos dos campos magnéticos externos são determinados pela força de Lorentz que é proporcional ao produto do vector da força do campo exterior pela corrente. São estes campos magnéticos externos que ocasionam deflexão do arco.

O destacamento das gotas deve-se ao balanço das forças actuates no processo de transferência e que estão representadas na figura 2.1. São elas a:

- Força da gravidade (F_g)
- Força de arrastamento do plasma (F_s)
- Força electromagnética (F_{em})
- Tensão superficial (F_γ)
- Força de vaporização (F_v)
- Força explosiva

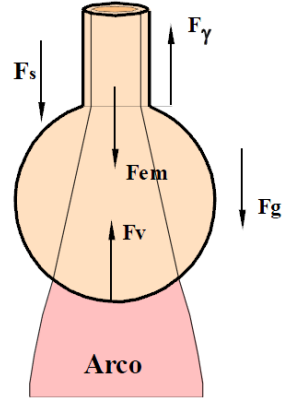


Figura 2.1: Forças que actuam na transferência de processos de soldadura MAG. Figura adaptada [12]

Sendo as quatro primeiros determinantes sobre o modo de transferência. Uma gota destaca-se quando:

$$F_g + F_s + F_{em} = F_\gamma \quad (2.1.1)$$

No entanto estas equações por si só não são suficientes para explicar os diferentes modos de transferência. O balanço das forças estáticas que actuam no processo de transferência não tem em conta o aquecimento do eléctrodo, o *stick out* e a resistência eléctrica do eléctrodo, características que são importantes, principalmente quando se utilizam intensidades de corrente baixas e onde a dimensão das gotas é determinante para o modo de transferência. Estas características podem ser então expressas pela equação 2.1.2:

$$\left(\frac{3KT}{2e} + V_a + \phi + \frac{\rho \cdot l \cdot I}{A_e} \right) I \quad (2.1.2)$$

Onde:

K é a constante de Boltzman,

T é a temperatura que entra no eléctrodo,

e é a carga do electrão,

V a queda de tensão no ânodo,

ϕ a função de trabalho do eléctrodo,

ρ é a resistência média do eléctrodo,

l é a extensão do eléctrodo,

A_e é a área de secção do eléctrodo [7].

2.2 Caracterização do processo de soldadura SER

O processo de soldadura por eléctrodos revestidos é um processo onde a ligação dos materiais é realizada pela fusão do material base e do eléctrodo. A transferência do material fundido do eléctrodo é realizada através do arco eléctrico em pequenas gotas de metal que se destacam depositando-se no material base. Este arco eléctrico é deslocado manualmente ao longo da junta a soldar com uma velocidade que se pretende constante e um comprimento de arco o mais estável possível, tentando assim reduzir as projecções de metal e fumos libertados [11]. Este processo é geralmente utilizado em manutenção, produção de pequenas séries e é bastante utilizado na soldadura de tubagens de grandes dimensões [13]. Na figura 2.2 ilustra-se esquematicamente o funcionamento do processo e na tabela 2.1 indicam-se os principais parâmetros.

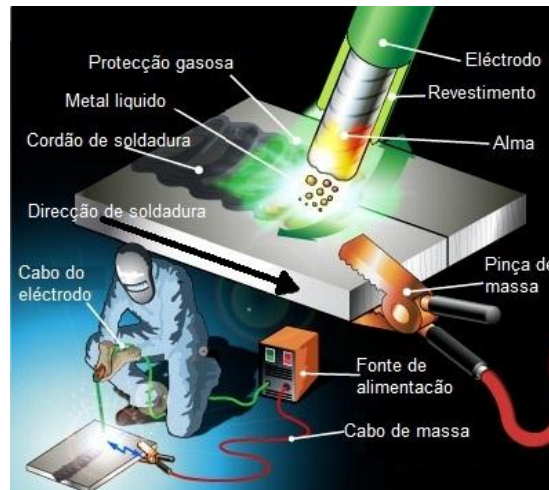


Figura 2.2: Princípio de funcionamento SER. Imagem adaptada de [13].

Tabela 2.1: Parâmetros de Soldadura.

Principais parâmetros operatórios do Processo SER

- Diâmetro e tipo de Eléctrodo
- Intensidade da corrente de soldadura
- Tensão
- Velocidade de Soldadura

2.2.1 Eléctrodos revestidos

Os eléctrodos revestidos são um elemento essencial tanto para o escorvamento do arco eléctrico como para fornecer o material de adição.

O eléctrodo revestido é constituído por dois elementos principais [14] ilustrados na figura 2.3: uma vareta que constitui a alma metálica e um revestimento constituído por materiais minerais ou orgânicos [11]. A principal função da alma metálica é a condução da corrente eléctrica e o fornecimento de material à junta.

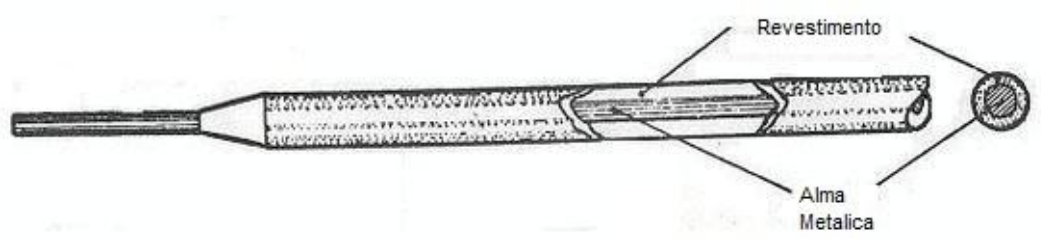


Figura 2.3: Eléctrodo revestido. Figura adaptada [15]

Os revestimentos dos eléctrodos têm várias funções e classificações. Nas tabelas 2.2 e 2.3 indicam-se as principais funções e classificações dos eléctrodos, respectivamente.

Tabela 2.2: Funções do revestimento [11, 14].

Principais funções do revestimento do eléctrodo
<ul style="list-style-type: none"> • Protecção da Alma do eléctrodo <p>O revestimento tem que proteger o material que está a ser transferido através do arco eléctrico, do oxigénio e do azoto do ar. Esta protecção é essencial para prevenir o aparecimento de bolhas de gás, evitar oxidação do metal depositado e proporcionar a resistência e ductilidade necessárias à soldadura.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Estabilização do arco <p>Evita o escorvamento lateral de arcos eléctricos sempre que se solda, e ajuda a manter um arco estável mesmo quando se varia o comprimento.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Adição de elementos de liga <p>Por vezes é necessário adicionar elementos de liga à soldadura para melhorar a qualidade do cordão de soldadura e a resistência pretendida. Os elementos de liga podem ser elementos como o crómio, níquel, molibdénio, vanádio e cobre.</p>

Tabela 2.2 (continuação): Funções do revestimento [11, 14].

Principais funções do revestimento do eléctrodo

- **Formação de escória**

A escória tem como principais funções, fornecer uma protecção adicional ao banho de soldadura, da atmosfera e absorver as impurezas que se encontram na superfície. Uma outra característica da escória é aumentar o tempo de arrefecimento do metal fundido.

- **Protecção da Alma do eléctrodo**

O revestimento isola a alma do eléctrodo prevenindo assim a ocorrência de curto-circuito durante a soldadura. Este revestimento serve ainda de protecção para o operador caso este toque no eléctrodo.

Tabela 2.3: Classificação do revestimento SER [11].

- **Rutílico**

Estes eléctrodos são muito utilizados por terem uma grande versatilidade. O revestimento é constituído principalmente por óxido de titânio, produzindo uma escória abundante, densa e de fácil remoção. Estes eléctrodos podem ser utilizados tanto com corrente contínua como corrente alternada, menos quando contêm uma quantidade elevada de pó de ferro. O material depositado tem uma fraca resistência à fissuração a quente, no entanto produzem cordões de bom aspecto e com uma penetração média.

- **Ácido**

Hoje em dia não é muito utilizado no entanto é um tipo de eléctrodo que confere boas características mecânicas ao material depositado, tendo uma baixa resistência à fissuração a quente. É constituído principalmente por óxido de ferro, manganês e sílica. A escória produzida é abundante, porosa e de fácil remoção. Este eléctrodo pode ser utilizado tanto em corrente alterna como contínua, proporcionando uma penetração média e uma taxa de fusão elevada.

- **Básico**

São indicados para aplicações de responsabilidade no entanto são altamente higroscópicos o que implica cuidados especiais como a secagem antes de serem utilizados. Estes eléctrodos contêm quantidades elevadas de carbonatos de cálcio, entre outros, como fluorite. Geram uma escória de características básicas que juntamente com o anidrido carbónico protege a soldadura da atmosfera. A possibilidade de ocorrer fissuração a frio com a utilização destes eléctrodos é mínima, e quando correctamente utilizados originam soldaduras de baixo teor de hidrogénio. A penetração é média com um cordão de boas propriedades mecânicas.

Tabela 2.3 (continuação): Classificação do revestimento SER [11]

- **Celulósico**

Estes eléctrodos são muito utilizados na soldadura de tubagens e embora não sejam muito utilizados para a realização de passes de enchimento, são indicados para esse efeito visto terem uma elevada penetração. O revestimento é em grande parte composto por materiais orgânicos, nomeadamente a celulose, materiais que quando se decompõem no arco eléctrico geram grandes quantidades de gases que protegem o metal líquido da atmosfera. O arco eléctrico gera muitos salpicos e fumos e produz pouca escória, originando um cordão com mau aspecto e com boas características mecânicas, mas frágil devido ao hidrogénio.

- **Oxidante**

Eléctrodos pouco utilizados, com propriedades inadequadas para aplicações de responsabilidade. O seu revestimento é constituído principalmente por óxido de ferro e manganês, produzindo uma escória oxidante, abundante e de fácil remoção. Estes eléctrodos podem ser utilizados tanto em corrente alternada como contínua e apresentam em geral uma baixa penetração.

2.2.2 Equipamentos do processo de soldadura SER

O equipamento para o processo de soldadura SER consiste numa fonte de energia, no porta-eléctrodos, na pinça de massa e nos cabos de conexão. A figura 2.4 ilustra os equipamentos e na tabela 2.4 pode apresentar-se uma descrição mais detalhada de cada equipamento.

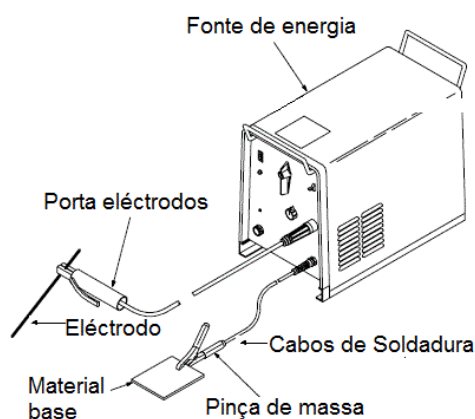


Figura 2.4: Equipamento SER. Imagem adaptada [16]

Tabela 2.4: Descrição dos equipamentos SER [14]

Equipamentos do processo de soldadura SER
<ul style="list-style-type: none"> • Porta eléctrodos <p>O porta eléctrodos liga o cabo de soldadura à máquina de soldar e conduz a corrente até ao eléctrodo.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Pinça de massa <p>Esta pinça faz a ligação do cabo terra ao material base. Esta ligação pode ser feita directamente ao material ou à bancada fazendo assim parte do circuito de soldadura.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cabos de soldadura <p>O cabos de soldadura ou seja o cabo terra e o cabo de ligação ao porta eléctrodos são muito importantes pois estes podem afectar as correntes e tensões que estão a passar para o eléctrodo. Estes devem ser flexíveis e ter um bom isolamento, e um diâmetro que permita a condução de corrente com uma queda de tensão mínima. Quanto maior for o cabo maior deverá ser o seu diâmetro.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Fontes de energia <p>As fontes de energia dos equipamentos de soldadura SER tanto podem ser de corrente contínua como alterna, no entanto a corrente normalmente utilizada é a contínua, daí a utilização de fontes com rectificadores que transformam a corrente alterna em contínua. Muitas vezes é também necessário inverter a polaridade da corrente contínua e para isso usam-se inversores que para além de passarem a corrente alterna para contínua, podem inverter a polaridade da corrente contínua.</p>

2.3 Caracterização do Processo de soldadura MAG

O processo de soldadura MAG é um processo de soldadura com gases de protecção gasosa à base de CO₂ ou misturas com outros gases como Ar ou He. A transferência do material fundido do eléctrodo pode ser realizada de vários modos. No entanto os principais são: transferência globular, curto-circuito e *spray*. Este processo tem uma alimentação contínua de um fio sólido e de um gás de protecção pela tocha de soldadura. A velocidade de alimentação pode ser regulada no equipamento tal como o caudal de gás. Existe um componente na tocha tipo “gatilho” com que o soldador controla a alimentação do eléctrodo. Neste tipo de situação a soldadura é semiautomática. O processo de soldadura MAG é utilizado em produção de grandes quantidades de construções soldadas e em manutenção [11, 13]. Na figura 2.5 encontram-se esquematizados

os princípios de funcionamento deste processo e na tabela 2.5 estão descritos os principais parâmetros do processo.

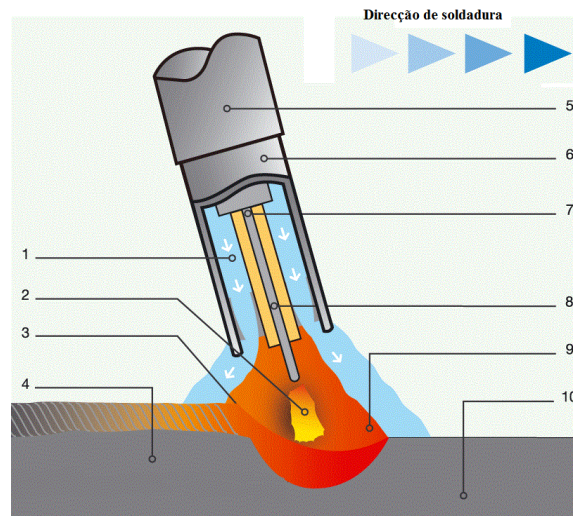


Figura 2.5: Princípio de funcionamento MAG Figura adaptada [17].

1) Fluxo de gás de protecção, 2) Arco eléctrico, 3) Banho de Soldadura, 4) Metal solidificado, 5) Tocha de soldadura, 6) Bocal de gás, 7) Tubo de contacto, 8) Fio de eléctrodo, 9) Atmosfera de protecção, 10) Material base

Tabela 2.5: Parâmetros de soldadura [11]

Principais parâmetros do Processo de soldadura MAG
--

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Intensidade de corrente • Tensão do arco (comprimento do arco) • Velocidade de soldadura • Extensão do eléctrodo • Tipo de gás de protecção • Diâmetro do eléctrodo |
|--|

2.3.1 Equipamento do processo de soldadura MAG

Na figura 2.6 encontra-se um esquema do equipamento básico para o processo de soldadura MAG.

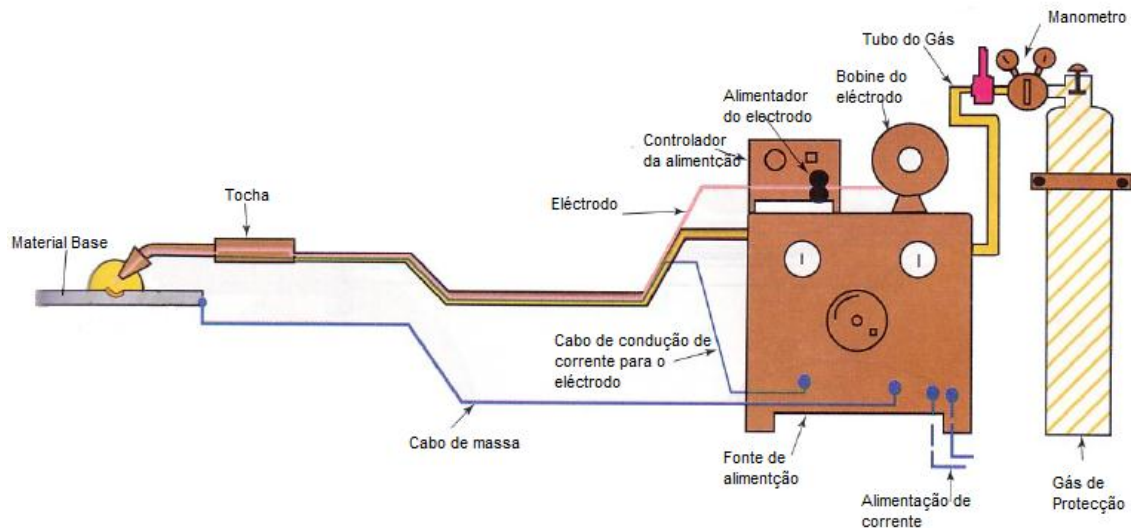


Figura 2.6: Ilustração de equipamento MAG. Figura adaptada [18]

Dos elementos que se podem distinguir na figura 2.6 é importante destacar:

- A fonte de alimentação é, como em muitos outros equipamentos de soldadura por arco eléctrico uma fonte rectificadora/inversora que possibilita a utilização de corrente continua ou alterna [18].
- O alimentador do eléctrodo, que pode ser de velocidade constante ou variável com a tensão. O alimentador a velocidade constante funciona com uma fonte de alimentação que fornece uma volta tensão constante e a velocidade é previamente seleccionada no equipamento. O segundo é alimentado directamente pela tensão do arco eléctrico e adapta a velocidade de acordo com as mudanças desta tensão [19].
- A tocha de soldadura por onde é alimentado o fio consumível e o gás de protecção.

2.3.2 Gases de Protecção do processo de soldadura MAG

Os gases utilizados são gases activos, usualmente misturas gasosas de árgon mais dióxido de carbono, árgon mais oxigénio ou misturas ternárias de árgon, dióxido de carbono e oxigénio. As percentagens, de cada constituinte variam conforme o poder de oxidação pretendido, no entanto, na grande maioria das misturas, o elemento árgon é o que está presente em maior quantidade.

2.3.3 Modos de transferência do processo de soldadura MAG

Neste processo de soldadura existem vários modos de transferência reconhecidos e classificados em diferentes categorias pelo Instituto Internacional de Soldadura (IIW). O modo de transferência que se utiliza é de grande importância, pois vai ter um impacto muito

importante na qualidade do cordão, na estabilidade do arco eléctrico e nos fumos libertados. Os modos de transferência mais utilizados são, o curto-circuito, globular e *spray*.

O modo de transferência por curto-circuito inicia-se criando mesmo um curto-circuito, fazendo com que o eléctrodo toque no material base cerca de 90 a 200 vezes por segundo. Com este modo de transferência a velocidade de alimentação do eléctrodo, a tensão e a taxa de deposição são normalmente baixas comparativamente com outros modos de transferência. Isto faz com que este modo seja muito versátil possibilitando a soldadura de chapas grossas ou finas e em qualquer posição. Este modo tem também algumas limitações como a falta de fusão em materiais mais espessos, uma fraca taxa de deposição e grande quantidade de salpicos.

Na figura 2.7 observa-se o que acontece durante o modo de transferência por curto-circuito. Na posição A o eléctrodo está em curto-circuito com o material base, não existe arco eléctrico nem fluxo de corrente. Na posição B vai ocorrer um aumento da resistência provocando também um aumento da temperatura e o início da fusão. Na posição C inicia-se o arco eléctrico e há fusão de material do eléctrodo que se vai depositar no banho de soldadura. Na posição D o arco eléctrico atinge o seu comprimento máximo, o calor do arco torna o banho de soldadura mais fluido e aumenta o diâmetro da ponta do eléctrodo. Na posição E a velocidade de alimentação do eléctrodo ultrapassa o calor do arco eléctrico e aproxima-se novamente do material base. Na posição F inicia-se um novo ciclo.

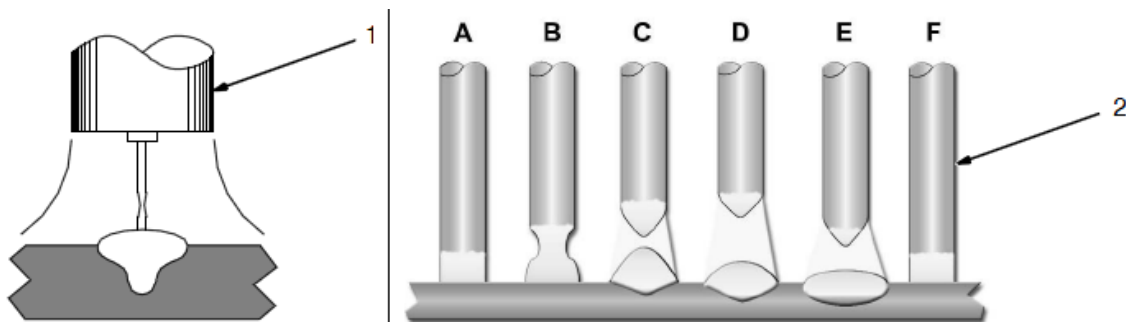


Figura 2.7: Modo de transferência por curto-circuito [19].

- 1) Transferência por curto-circuito. 2) Descrição do modo de transferência. A) Contacto do eléctrodo com base. B) Aumento de resistência. C) Início de arco eléctrico. D) Comprimento máximo do arco. E) Reaproximação do eléctrodo à base. F) Início do novo ciclo.

O modo de transferência globular é um modo que se encontra entre os modos de transferência por curto-circuito e *spray*. Neste modo de transferência vai ocorrer a separação de material do eléctrodo em dimensões maiores do que nos outros modos. Este modo de transferência ocorre quando os parâmetros de soldadura como a tensão, intensidade e velocidade de alimentação são superiores aos parâmetros do modo de transferência por curto-circuito. As maiores limitações deste modo são a presença de salpicos, uma aparência não tão boa como em

spray e a soldadura está limitada a materiais com o mínimo de 3 mm de espessura [19]. Na figura 2.8 observa-se uma ilustração deste modo de transferência.

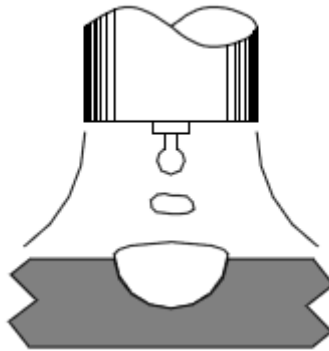


Figura 2.8: Modo de transferência Globular [19]

O modo de transferência por *spray* é um modo onde a transferência do material fundido do eléctrodo para o material base é feito por pequenas gotas que são transportadas ao longo do arco eléctrico. Comparativamente com os outros modos de transferência, a transferência por *spray* utiliza valores de tensão, velocidade de alimentação e intensidade superiores. Este modo de transferência apresenta altas taxas de deposição, uma boa fusão e penetração, boa aparência do cordão, a capacidade de utilizar eléctrodos de diâmetros maiores e verificam-se poucos salpicos. As principais limitações deste modo de transferência são a limitação de apenas soldar materiais com uma espessura mínima de 3 mm e a necessidade de preparar com um cuidado extra a soldadura [19]. Este modo de transferência tende a ficar limitado com o aumento da temperatura e com o aumento do elemento activo da mistura gasosa [7].

2.4 Emissão de fumos na soldadura por fusão

Uma correcta manipulação dos parâmetros de soldadura permite, por si só, um controlo da quantidade de fumos gerados. No entanto, libertam-se sempre fumos e partículas que podem atingir dimensões inferiores a 100nm [6]. Para as nanopartículas é ainda desconhecida uma relação directa entre os parâmetros operacionais de soldadura e a libertação destas [5].

Um único soldador produz 10 a 40 g de fumos de soldadura por hora [20], que têm impacto na saúde dos soldadores. A composição química dos fumos é um parâmetro importante e é influenciado directamente pelos parâmetros de soldadura e pelos materiais.

Em relação à geração de fumos na soldadura SER quanto maior for a intensidade de corrente e o arco eléctrico, maior vai ser a geração de fumos. A escolha de eléctrodos vai ter um impacto directo na geração de fumos.

No processo de soldadura MAG a taxa de formação de fumos aumenta com o aumento da temperatura e instabilidade do arco eléctrico, com o componente activo da mistura gasosa, com a condutividade térmica da mistura gasosa e com o aumento do volume das gotas de material. A quantidade de fumos libertada durante a soldadura é maior para misturas com dióxido de carbono comparativamente com misturas com oxigénio tendo a mesma capacidade de oxidação [7].

2.4.1 Nanopartículas

A influência dos fumos de soldadura no corpo humano tem efeitos diferentes dependendo da composição desses fumos. Algumas composições têm efeitos a curto prazo como a febre da soldadura, outras provocam efeitos de longo prazo como por exemplo o manganês que pode provocar a doença de Parkinson. Na tabela 2.6 podem-se ver alguns dos efeitos que os componentes dos fumos têm na saúde [21].

Tabela 2.6: Fumos de soldadura e efeitos na saúde [21, 22].

Elementos de fumos de soldadura, gases e os seus efeitos		
Elementos	Fonte	Efeitos na saúde
Crómio (VI)	Processos de soldadura em aço inoxidável. Fabricação de pigmentos de crómio, eléctrodos.	Irritação da pele, irritação do tracto respiratório, efeitos no nariz e orelhas; efeitos crónicos incluem cancro do pulmão, danos nos rins e fígado.
Óxidos de ferro	Processos de soldadura em todos os aços ou metais.	Irritação do nariz e pulmões; siderose (deposição de pós metálicos nos pulmões).
Manganês	Processos de soldadura, aços de tensão de ruptura elevada	Pneumonite química; efeitos crónicos incluem distúrbios do sistema nervoso.
Níquel	Processos de soldadura em aço inoxidável, galvanização.	Efeitos dermatológicos, doenças pulmonares do tipo asmáticas; efeitos crónicos incluem cancro (nariz, laringe, pulmão), irritação do tracto respiratório, disfunção renal.
Fluoretos	Revestimento de eléctrodos, gás de protecção.	Irritação dos olhos, nariz e garganta. Sintomas gastrointestinais; efeitos crónicos incluem problemas de ossos e articulações, líquido nos pulmões e disfunções dos rins.

Tabela 2.6 (continuação): Fumos de soldadura e efeitos na saúde [20, 22]

Elementos de fumos de soldadura, gases e os seus efeitos		
Elementos	Fonte	Efeitos na saúde
Ozono	Formado no arco eléctrico	Efeitos agudos incluem líquido nos pulmões e hemorragias; efeitos crónicos incluem alterações nas funções pulmonares.
Óxidos de nitrogénio	Formados no arco eléctrico	Pneumonite, edema pulmonar; bronquite crónica, enfisema e fibrose pulmonar.
Monóxido de carbono	Gases de protecção com dióxido de carbono e revestimentos de eléctrodos	Dores de cabeça, náuseas, tonturas, desmaios, morte; efeitos crónicos cardiovasculares

Os métodos de amostragem tradicionais para recolha de nanopartículas têm-se mostrado insuficientes. Em estudos recentes, foram aplicadas metodologias como a colocação de amostradores estáticos nas áreas de trabalho, a utilização de bombas de amostragem pessoal, com filtros colocados na zona de respiração do operador ou na colocação de equipamentos de leitura em tempo real que podem ser estáticos ou pessoais. Com estes métodos, os parâmetros que podem ser determinados são: o tamanho, a massa, a concentração e a composição química das nanopartículas. Nas metodologias aplicadas em estudos já realizados não foi possível obter o parâmetro da área de superfície de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar que como foi dito é o parâmetro mais relevante [23].

Podem-se considerar dois tipos de exposição profissional a nanopartículas, há exposição relacionada com a produção e utilização de nano-objectos e nano-materiais e existe também a exposição em processos cuja finalidade não é a de produção de nanopartículas, mas que tem como consequência a libertação de nanopartículas.

Este segundo tipo de exposição pode-se encontrar na indústria em processos que estão indicados na tabela 2.7:

Tabela 2.7: Processos e potenciais fontes de emissão de nanopartículas [24].

Tipo de processos	Exemplos de fontes de emissão
Térmicos	Soldadura de Metais
	Fundição de metais
	Corte de metais
	Tratamentos térmicos de superfícies
Mecânicos	Maquinação
	Furação
	Polimento
Combustão	Emissões de motores
	Centrais de incineração, térmicas e crematórios
	Aquecimento a gás

Foi definida uma representação das várias regiões do aparelho respiratório pela *International Commission of Radiological Protection* (ICRP) e pela Agência Federal Americana de Protecção Ambiental (US EPA) apresentada na figura 2.9. Estas são regiões onde é possível haver deposição de nanopartículas. Foi também desenvolvido pelo ICRP um modelo de deposição de partículas no pulmão humano para aerossóis. Para a construção deste modelo é necessário considerar vários parâmetros, como a taxa de respiração, o volume do pulmão, a actividade respiratória nariz/boca, entre outras características do sistema respiratório [9].

É possível obter curvas de deposição tanto para a deposição traqueobrônquial como alveolar, dependente dos parâmetros já referidos. Sendo que as aplicações de higiene industrial são as que mais interesse suscitam, foram desenvolvidos pela Conferência dos Higienistas Oficiais Americanos (ACGIH) parâmetros para um trabalhador de referência de modo a ser possível obterem-se as curvas de deposição:

a) Parâmetros fisiológicos

Tipo de trabalhador: homem adulto

Capacidade residual funcional: 2200 cm³

Espaço morto extratorácico: 50 cm³

Espaço morto bronquial: 49 cm³

Espaço morto bronquiolar: 47 cm³

Altura: 175 cm

Diâmetro da traqueia: 1,65 cm

Diâmetro do primeiro brônquio: 0,165 cm

b) Parâmetros relacionados com a actividade

Nível de actividade: exercício leve

Tipo de actividade: respiração apenas pelo nariz

Taxa de ventilação: 1,3 m³/h

Frequência de respiração: 15,0 inalações/minuto

Volume de inalação: 1450 cm³

Fracção inalada através do nariz: 1,0

c) Parâmetros do aerossol

Diâmetro médio aerodinâmico: 0,001 µm – 0,5 µm

Desvio padrão geométrico: 1,0

Densidade: 1,0 g/cm³

Factor de forma: 1,0

Na figura 2.10 encontram-se representadas as curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão baseadas nestes parâmetros e no modelo ICRP. Na curva de deposição traqueobrônquial representa-se a fracção de aerossol que se vai depositar na região traqueobrônquial do pulmão, enquanto na curva de deposição alveolar encontra-se representada a fracção de aerossol que se deposita na região alveolar do pulmão. Em relação às nanopartículas, sabe-se que os seus efeitos na saúde vão ocorrer nas regiões mais profundas do aparelho respiratório. Deste modo, a fracção respirável do aerossol na região alveolar é a medida de maior relevância [9].

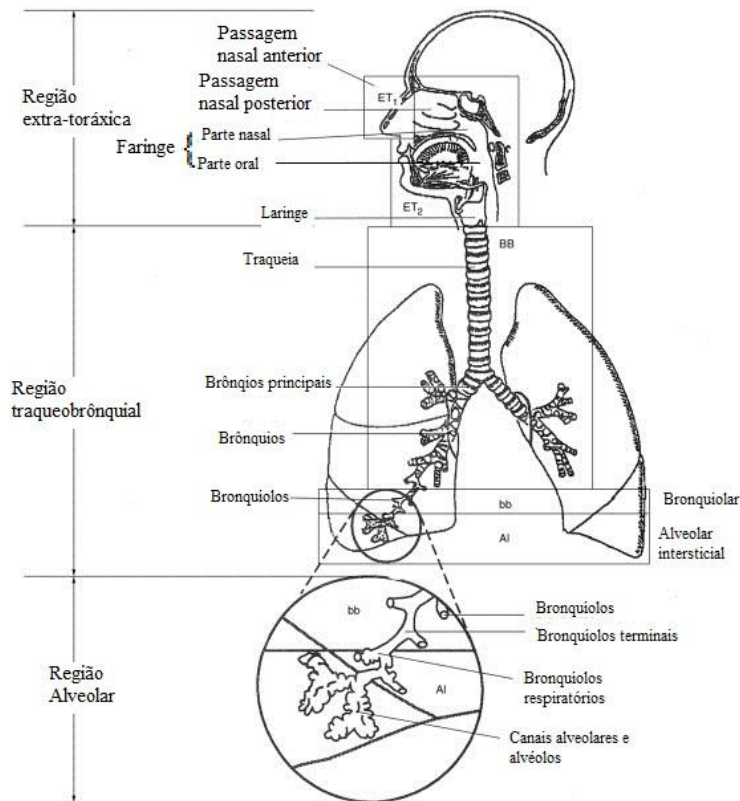


Figura 2.9: Modelo das diversas regiões do pulmão humano. Figura adaptada [9].

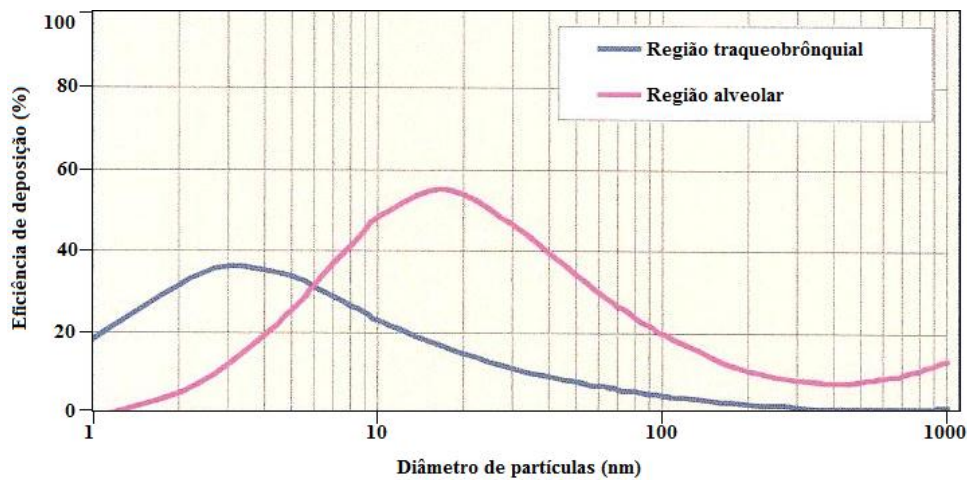


Figura 2.10: Curvas de deposição na região traqueobrônquial e alveolar do pulmão. Figura adaptada [9].

Estas curvas podem ser obtidas através de uma parametrização para o modelo de deposição de partículas no pulmão humano do ICRP. Para cada região pulmonar foram obtidas equações que dão a eficiência de deposição como um rácio da concentração total de partículas suspensas.

A eficiência de deposição de partículas na região do nariz (cabeça) em acordo com o modelo criado pelo ICRP, onde d representa o diâmetro da partícula em μm e I representa a fracção de partículas inaláveis, é dada pela equação 2.4.1 [10]:

$$D_{HA} = I(d) \left(\frac{1}{1 + 934d^{1.183}} + \frac{1}{1 + 934d^{1.183}} \right) \quad (2.4.1)$$

A facção de partículas suspensas que são inaladas é dada pela seguinte equação:

$$I(d) = 1 - 0.5 \left(1 - \frac{1}{1 + 0.00076d^{2.86}} \right) \quad (2.4.2)$$

A eficiência de deposição na região traqueobrônquial é dada pela seguinte equação:

$$D_{TB} = \frac{0.00352}{d} (\exp(-0.234(\ln d + 3.40)^2) + 63.9 \exp(-0.819(\ln d - 1.61)^2)) \quad (2.4.3)$$

A eficiência de deposição na região alveolar é dada pela seguinte equação:

$$D_a = \frac{0.0155}{d} (\exp(-0.416(\ln d + 2.84)^2) + 19.11 \exp(-0.482(\ln d - 1.362)^2)) \quad (2.4.4)$$

A eficiência total de deposição das partículas em todas as regiões é dada apenas pela soma das eficiências de cada região. A capacidade de deposição em cada região do sistema respiratório consiste em dois modelos, um que corresponde à parte depositada por difusão e outro que corresponde à parte depositada aerodinamicamente. Estes dois modelos correspondem aos primeiros e segundos termos respectivamente das equações 2.4.1, 2.4.3 e 2.4.4.

2.5 Sistemas de remoção

Os processos de soldadura MIG/MAG e SER são utilizados em cerca de 70 % dos trabalhos de soldadura e nestes processos a redução dos fumos pode ser obtida através da redução de temperatura do arco eléctrico e de a utilização de gases de protecção com a capacidade de condensar os fumos libertados reduzido assim a sua capacidade de dispersão e impedindo mesmo que estes saiam do arco eléctrico [21].

A ventilação e extracção é uma forma eficaz de remoção de fumos. No entanto a aplicação destes sistemas de ventilação não é fácil o que acaba por tornar estes sistemas ineficientes. Muitas vezes os trabalhos de soldadura não são realizados em postos de trabalho fixos e também os braços de recolha de fumos necessitam de ser flexíveis de modo a poderem ser reposicionados. O desconforto e a forma pouco prática de colocar estes extractores de fumos nos locais de trabalho faz com que muitas vezes não sejam utilizados [21].

Existem equipamentos pessoais de protecção de fumos como mascaras adaptadas com alimentação de ar e filtros para fumos, no entanto estes equipamentos ainda não possuem capacidade de filtrar as nanopartículas que são libertadas nos processos de soldadura.

Uma outra forma de extracção de fumos de soldadura em processos de soldadura MIG/MAG é ainda fazendo a extracção dos fumos gerados pela tocha de soldadura. Estes sistemas são de fácil utilização e possuem uma boa capacidade de redução de fumos.

2.6 Conclusão

Do exposto sobre os processos de soldadura e os trabalhos já realizados sobre libertação de fumos e de nanopartículas, torna-se evidente a necessidade de realizar estudos sistemáticos que permitam um maior conhecimento sobre a relação entre os parâmetros operacionais dos processos de soldadura SER e MAG, e a quantidade, morfologia e composição química das nanopartículas libertadas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

O processo de soldadura MIG/MAG tem a possibilidade de ser automatizado permitindo assim controlar os parâmetros da soldadura com maior precisão.

Existem inúmeros sistemas de automatização deste processo, no entanto, os que se podem encontrar no mercado comportam custos muito elevados. Assim concebeu-se e construiu-se uma mesa de soldadura.

Neste capítulo é descrito o trabalho experimental realizado nomeadamente:

- Realização de soldaduras para recolha de partículas.
- Descrição dos processos, metodologias e equipamentos usados.

3.2 Objectivos

O procedimento experimental tem como principais objectivos:

- Construção de uma mesa que possibilite repetibilidade dos parâmetros e condições de soldadura.
- Realização de ensaios de soldadura por fusão dos processos de soldadura SER e MAG com diferentes condições operatórias
- Recolha e caracterização de partículas, nomeadamente nanopartículas, resultantes de diversas condições processuais em soldadura por fusão de aços.

3.3 Automatização do processo de soldadura MAG

3.3.1 Principais requisitos:

As principais características pretendidas para a mesa de soldadura foram:

- Controlo automático de velocidade de soldadura
- Controlo do comprimento do arco eléctrico
- Controlo da posição da Tocha
- Custo de construção e manutenção reduzido

3.3.2 Planeamento da construção

O planeamento da construção da mesa de soldadura começou por um levantamento de recursos disponíveis, nomeadamente:

- Guia linear *DryLin® ZLW*
- Motor passo a passo *Astrosyn MY23HS1-5*
- Controlador de motor *P402AMicrostepping Motor drive*
- *NI CompactDAQ 9178*
- *NI High-Speed Bidirectional Digital I/O Module 9401*
- *NI Sourcing Digital Output Module 9474*
- Perfis tubulares e chapas em aço de várias dimensões;
- Blocos e varões de alumínio de várias dimensões;
- Máquina de soldar ProMig 501 da Kempi.

As características de cada componente são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Principais características dos equipamentos

- **Guia linear *DryLin® ZLW***

Correia dentada, comprimento de 1400 mm, curso útil de 1300 mm, guia e base do patim em alumínio, não necessita de lubrificação e capacidade de acoplar um motor para controlo do patim.



Figura 3.1: Guia Linear [25]

- **Motor passo a passo *Astrosyn MY23HS1-5***

Motor Bipolar com torque elevado e de alta precisão



Figura 3.2: Motor passo a passo [26]

- **Controlador de motor *P402A Microstepping Motor drive***

Alimentação até 40 V e 2 A, alta resolução de selecção dos passos do motor e protecção contra curto-circuito e sobre cargas de tensão. Quinze modos de resolução de passos em modo binário ou decimal.



Figura 3.3: Controlador do motor [27]

- ***NI CompactDAQ 9178***

Chassi para módulo. Ligação USB ao computador, possibilidade de utilização de múltiplos módulos com capacidade de *input/output*.



Figura 3.4: NI-Compact DAQ [28]

- ***NI High-Speed Bidirectional Digital I/O Module 9401***

Módulo de 8 canais, capacidade de *input/output* de fácil aplicação e utilização.



Figura 3.5: Módulo 9401 [29]

Tabela 3.1 (continuação): Principais características dos equipamentos

- **NI Sourcing Digital Output Module 9474**

Módulo digital de 8 canais, capacidade de alimentação externa até 30 V, de *output*.



Figura 3.6: Módulo 9474 [30]

- **Máquina de soldar ProMig 501 da Kemppi com fonte de alimentação**

Capaz de soldar nos processos de soldadura MIG/MAG, SER e TIG. Alimentação de fio de soldadura, ajustamento da velocidade de alimentação, tensão e intensidade automático. Fonte de alimentação Kemppi Pro3200 *evolution* com a capacidade de inverter a polaridade e de trabalhar com tensão alterna ou contínua.



Figura 3.7: Máquina de soldar ProMig 501

3.3.3 Estrutura da Mesa de soldar

Estando disponível no Laboratório de Tecnologia Industrial uma guia linear *Drylin* da Igu, desenhou-se uma estrutura de apoio (figura 3.8). No anexo A1.1.apresentam-se os desenhos técnicos.

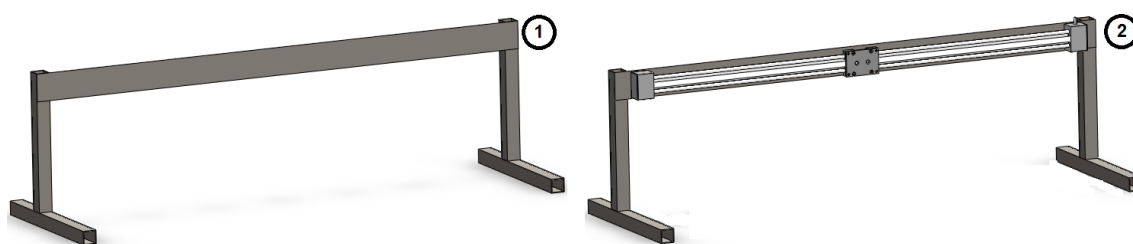


Figura 3.8: Estrutura de suporte da guia.

1) Estrutura sem guia, 2) Estrutura com guia linear

Esta estrutura foi construída com os tubos de perfil quadrado e chapa, ligados por soldadura. A fixação da guia linear foi realizada através de suportes em alumínio da Igu que permitem aparafusar a guia linear à estrutura de apoio.

Para se poder fixar o motor que dá movimento à correia da guia foi necessário maquinar um suporte a partir de dois blocos de alumínio. Este bloco foi todo feito na fresadora e no torno

mecânico. Na figura 3.9 pode-se ver o suporte e o motor. E na figura 3.10 mostra-se como este suporte foi fixo na guia linear. No anexo A1.2 apresentam-se os desenhos técnicos com cotas do suporte do motor.

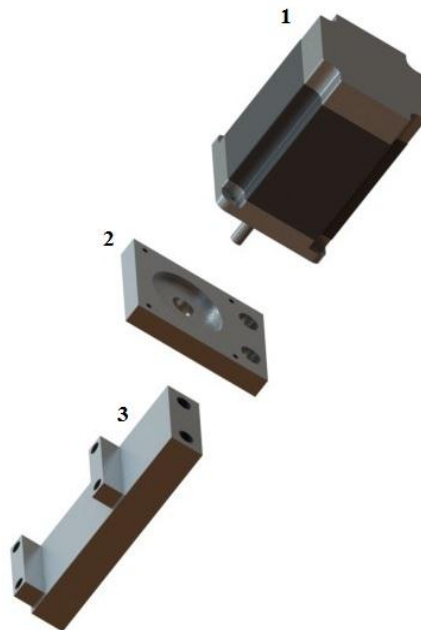


Figura 3.9: Imagens do suporte e motor.

1) Motor, 2) Base de fixação do motor, 3) Fixação à guia linear



Figura 3.10: Mesa de soldar com Suporte do motor e motor fixados na Guia

Após ter a guia linear montada na estrutura, construiu-se um braço para fixar a tocha de soldadura, para controlar a posição da tocha, ou seja, que possibilitasse um controlo do ângulo de soldadura e da distância da tocha ao material base. Foi projectada uma estrutura fixa no

patim da guia linear e que possui a capacidade de posicionamento da tocha como pretendido (figura 3.11).

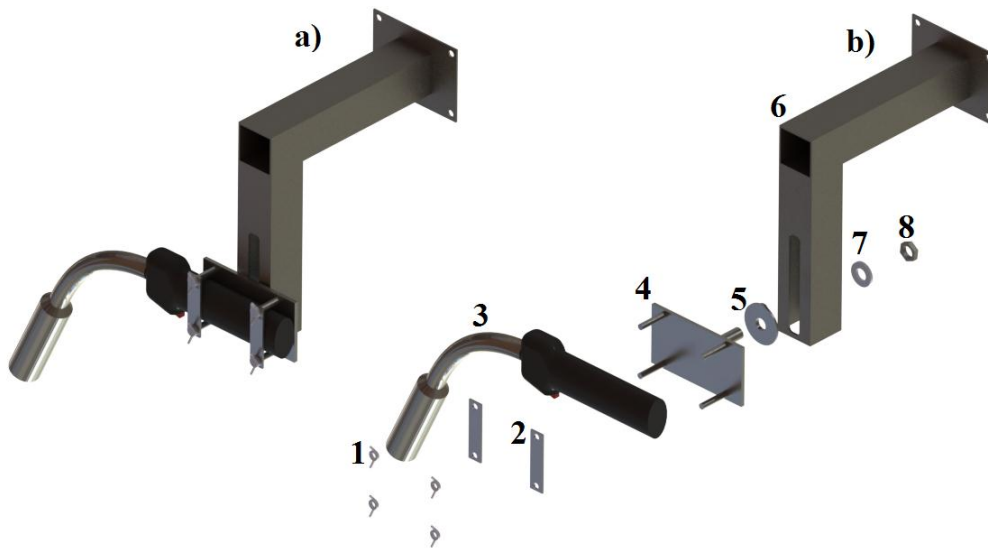


Figura 3.11: Fixação da tocha.

a) Conjunto dos componentes de fixação, b) Vista explodida.

1) Porca de orelhas, 2) Barras de fixação, 3) tocha de soldadura, 4) chapa de apoio da tocha, 5) anilha com saliência, 6) braço de apoio, 7) anilha, 8) porca.

Foi ainda necessário desenvolver uma solução para proteger a guia linear de salpicos da soldadura. Das várias possibilidades optou-se por usar uma manta corta-fogo e adapta-la à mesa de modo a não prejudicar o movimento do patim da guia linear e que a pudesse proteger. Para colocar a manta corta-fogo foram soldados três apoios à chapa onde a guia está fixada e a esses apoios foi rebitada uma calha com roletes que deslizam nesta e permitem a fixação da manta corta-fogo. Na figura 3.12 ilustram-se os três apoios e a calha para fixar a manta corta-fogo. Na figura 3.13 apresenta-se uma imagem final da mesa construída.



Figura 3.12: Mesa de soldar com calha de fixação da manta corta-fogo.

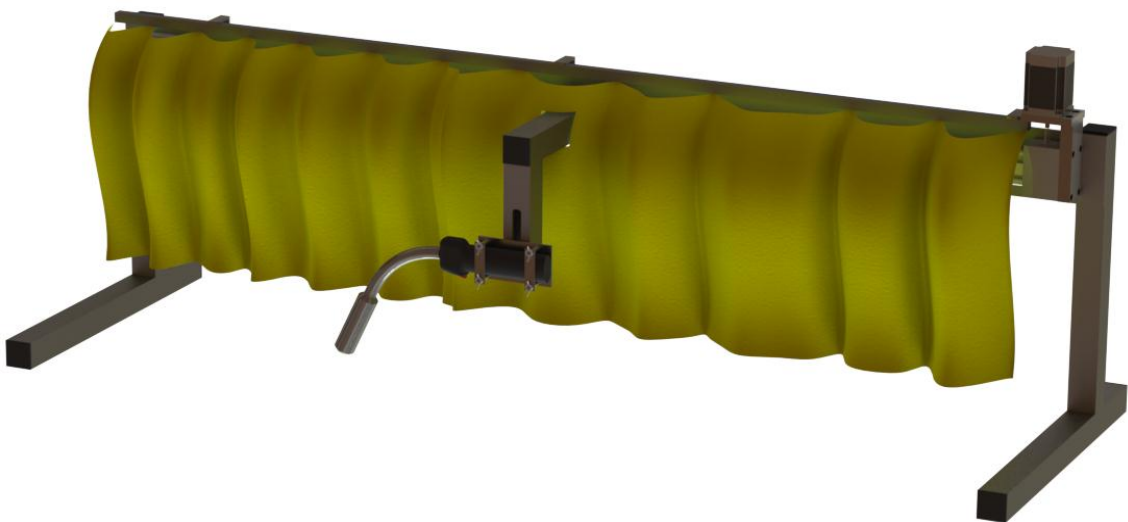


Figura 3.13: Mesa de soldar com todos os elementos

3.3.4 Adaptação da máquina de soldar

Para automatizar o processo de soldadura fez-se uma alteração simples à máquina de soldar existente no laboratório visando o accionamento da tocha através do computador. Existem diversas formas de realizar esta automatização disponíveis no mercado, no entanto como um dos principais constrangimentos foi limitar os custos. Foi necessário entender o funcionamento da tocha e da actuação desta. A tocha existente no equipamento de soldar do laboratório é uma tocha manual da Kemppi MMT42 ilustrada na figura 3.14.



Figura 3.14: Tocha MIG/MAG MMT42 [31].

O accionamento da tocha de soldar é feito através de um gatilho que, ao ser pressionado, fecha um circuito eléctrico e acciona a libertação do gás de protecção e o alimentador do fio do eléctrodo. A solução encontrada para o accionamento da tocha foi realizar o fecho desse circuito eléctrico directamente na máquina através de um relé eléctrico que ao ser activado por um controlador ligado a um computador acciona a tocha. Foi necessário colocar um interruptor para se poder optar por soldadura manual ou por soldadura automática. Foi também colocada uma ficha de ligação, para se poder fazer a activação do relé colocado na máquina através dos controladores da *National Instruments*. O interruptor de alavanca e a ficha de ligação podem ver-se na figura 3.15.



Figura 3.15: Pannel frontal da máquina de soldar.

1) Interruptor de alavanca, 2) Ficha de Ligação do relé.

3.3.5 Controladores da mesa

Para comandar a mesa por computador foi necessária a utilização de controladores e módulos electrónicos para realizar a comunicação entre o computador e a mesa de soldadura. O controlo do motor passo a passo é realizado através de um controlador da *Astrosyn* alimentado por uma fonte de alimentação de 24 V e comandado pelos módulos da *National Instruments*. O controlador do motor faz com que este rode o seu veio passo a passo através de uma onda quadrada de +5 V a -5 V, gerada electronicamente, como a representada na figura 3.16. A velocidade do motor é controlada através da manipulação da frequência da onda.

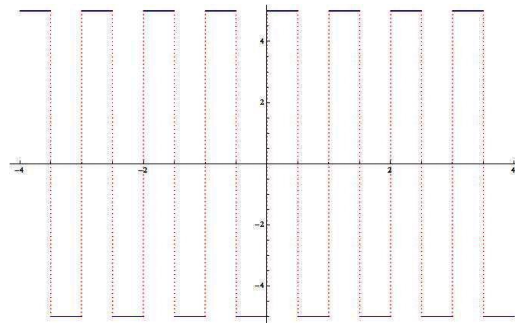


Figura 3.16: Onda quadrada do motor passo a passo

Os dois módulos da *National Instruments* utilizados foram aplicados no chassi *NI Compact DAQ 9178* e utilizados para enviar sinais para o accionamento da tocha de soldadura, para o controlador do motor da mesa e para os fins de curso da mesa. Estes sinais enviados pelos controladores permitem a automação da mesa e são gerados com o auxílio de *software* próprio descrito no capítulo 3.3.6. No anexo A2, apresenta-se o manual de utilização da mesa e ainda uma descrição mais detalhada do modo de operação dos controladores.

3.3.6 Software de controlo da mesa

Todo o equipamento foi controlado por computador através do Labview. Este *software* permite criar um *interface* com o utilizador da mesa de soldar simples de utilizar e de interpretar. Na figura 3.17 ilustra-se o ambiente do programa construído para controlar a mesa de soldar.

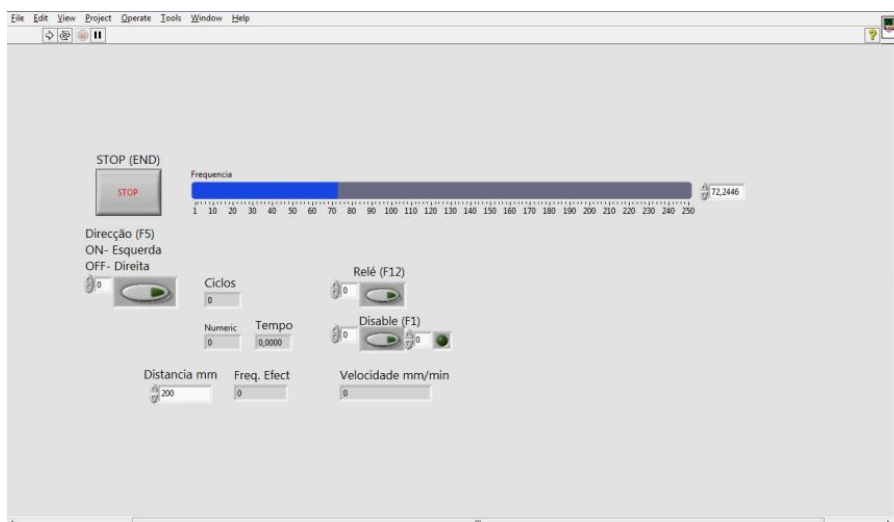


Figura 3.17: Interface LabView

No *interface* o utilizador pode controlar o sentido do movimento no botão “Direcção”, pode controlar a frequência da onda que o programa simula através de impulsos alternados, na barra “Frequência”, pode definir a distancia que quer soldar ou que a tocha se desloque introduzindo

essa distancia em milímetros no espaço “Distância”, no botão “Relé” é possível activar ou desactivar a soldadura, ou seja, este botão simula o pressionar do gatilho da tocha.

Outro parâmetro que o operador pode ainda controlar é o “*Disable*”. Este botão quando accionado desliga o motor e tanto pode ser accionado pelo utilizador como por um dos dois fins de curso existentes na mesa, o botão “Stop” pára tanto a mesa como o programa. Os outros campos existentes neste *interface* são de indicação, o campo “Tempo” indica o tempo de soldadura, o campo “Freq. Efectiva” indica a frequência real que está a ser gerada, que não é igual à seleccionada pelo operador porque o tempo de processamento do programa influencia a frequência efectiva e vai variar de computador para computador. O campo “Velocidade” indica a velocidade de soldadura ou a velocidade de deslocamento da tocha, os campos “Ciclos” e “*Numeric*” estão relacionados. O campo “Ciclos” mostra o número de ciclos que o programa gera correspondente à distância introduzida e o campo “*Numeric*” é um contador de ciclos que mostra em tempo real em que ciclo o programa se encontra.

3.3.7 Validação da mesa de soldadura

Foram realizadas verificações do equipamento para confirmar que todos os comandos introduzidos no programa criado em *Labview* realizavam a função correspondente. Os testes realizados foram os seguintes:

- Percorrer e soldar distância introduzida,
- Parar ao accionar um fim de curso,
- Parar quando o botão “Stop” é seleccionado,
- Activar/desactivar o relé no botão “Relé”,
- Mudar e seleccionar a direcção pretendida no botão “Direcção”,
- Variação da frequência e da velocidade através da barra “Frequência”,
- Posicionamento da tocha,
- Qualidade dos cordões resultantes.

Na figura 3.18 ilustram-se alguns cordões de soldadura realizados com mesa.

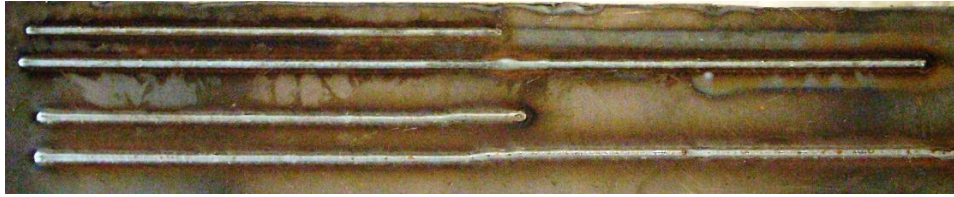


Figura 3.18: Cordões de soldadura

Verifica-se que se consegue um arco eléctrico estável, uma velocidade de soldadura constante e que existe boa repetibilidade da mesa.

3.4 Materiais

O material base para os ensaios de soldadura foi um aço não ligado com a composição química na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Composição química do material base (% em peso).

C	Si	Mn	P	S
0,0542	0,1940	0,5660	0,0246	0,0103

O eléctrodo AWS 5.18 ER70S-6 é normalmente usado na soldadura de aços não ligados. A composição química do eléctrodo encontra-se na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Composição química ER 70S-6 (% em peso) [32]

C	0,06-0,15	Ni	0,15
Mn	1,4-1,85	Cr	0,15
Si	0,8-1,15	Mo	0,15
P	0,025	V	0,03
S	0,035	Cu	0,5

Para o processo SER usaram-se dois eléctrodos. O eléctrodo rutílico AWS 5.1 E6013 tem um revestimento composto por silicatos de potássio, com um teor médio de hidrogénio [32]. A composição química do material depositado pelo eléctrodo encontra-se na tabela 3.4. O eléctrodo básico AWS 5.1 E 7018-1 tem um revestimento composto por silicatos de potássio e pó de ferro, com um teor de hidrogénio baixo [32]. A composição química do material depositado pelo eléctrodo encontra-se na tabela 3.5.

Tabela 3.4: Composição química do material depositado do eléctrodo E6013 (% em peso) [33].

C	0,04-0,07	Ni	≤ 0,07
Mn	0,32-0,45	Cr	0,02-0,04
Si	0,16-0,24	Mo	≤ 0,02
P	0,01-0,02	V	0,01-0,02
S	0,01-0,02		

Tabela 3.5: Composição química do material depositado do eléctrodo E7018 (% em peso) [34].

C	0,04-0,07	Ni	0,01-0,07
Mn	0,80-1,44	Cr	0,01-0,07
Si	0,28-0,51	Mo	0,11-0,28
P	0,006-0,019	V	≤ 0,01
S	0,003-0,013	Mn+Ni+Cr+Mo+V	0,93-1,75

3.5 Equipamentos utilizados

3.5.1 Máquina de soldar ProMig 501 da Kemppi

O equipamento utilizado para os processos de soldadura MAG e SER foi uma máquina de soldar ProMig 501 da Kemppi utilizada em conjunto com uma fonte de alimentação Pro3200 *evolution* do mesmo fabricante. No painel de funções do equipamento é possível seleccionar o processo de soldadura e o diâmetro do fio. A corrente do arco eléctrico com a variação da velocidade de alimentação do fio ou no caso de soldadura por eléctrodos revestidos pode ser definida no painel de funções. A tensão de soldadura é ajustada automaticamente pelo equipamento de acordo com o comprimento do arco. Dentro dos processos de soldadura ainda permite a selecção entre MIG convencional, sinérgico ou pulsado.

3.5.2 Monitor de área de superfície de nanopartículas

O equipamento utilizado na avaliação da exposição a nanopartículas foi um medidor NSAM (*Nanoparticle Surface Area Monitor*) TSI, Modelo 3550. Este equipamento indica a área superficial de partículas depositadas no pulmão humano expressas como micrómetros quadrados por centímetro cúbico de ar ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), correspondendo às regiões traqueobrônquial (TB) ou alveolar (A) do pulmão. O funcionamento do equipamento baseia-se na difusão de cargas electrostáticas depositadas no aerossol de partículas que é carregado, seguindo-se a sua detecção por electrómetro. A amostra é colhida através de uma bomba após passagem num ciclone que retém as partículas com dimensões superiores a 1 μm . Após estas fases o fluxo é dividido em dois fluxos: um com um caudal de 1 l/min passa por um filtro de carbono, um filtro HEPA, um ionizador que induz cargas positivas nos iões e que por fim vai para uma câmara de mistura. O outro fluxo com um caudal de 1.5 l/min segue logo para a câmara de mistura onde se mistura com o fluxo ionizado, onde os iões em excesso são removidos por um sistema de aprisionamento de iões. A voltagem do sistema de aprisionamento de iões pode ser alterada de modo a poder-se optar entre o modo traqueobrônquial e a alveolar.

Para avaliação da exposição a nanopartículas, o equipamento é operado no modo (A), correspondendo à deposição de partículas na região alveolar do pulmão de um trabalhador de referência de acordo com os modelos da ICRP e da ACGIH [35,9].

O sistema é automatizado e a análise dos dados é feita por computador com um *software* específico da T.S.I.

Nas figuras 3.19 e 3.20 apresenta-se uma fotografia do monitor e o esquema de funcionamento do equipamento, respectivamente.



Figura 3.19: NSAM, monitor de área de superfície de nanopartículas

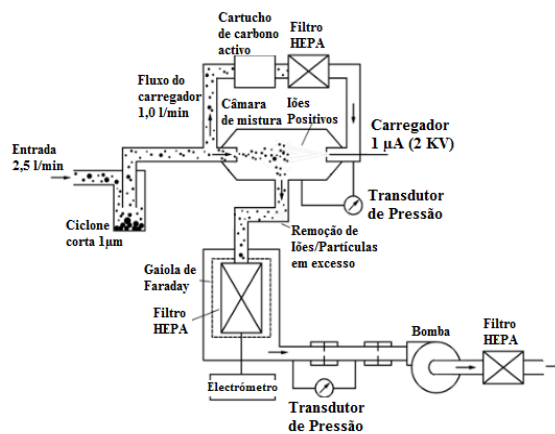


Figura 3.20: Esquema de funcionamento do NSAM [35]

3.5.3 Amostrador de aerossóis nanométricos

As partículas em suspensão foram recolhidas num amostrador de aerossóis nanométricos, NAS, que atrai as partículas através de um fluxo de ar para uma grelha fixada a um precipitador electrostático. Neste estudo as grelhas utilizadas foram grelhas de cobre fixadas ao precipitador por uma fita de carbono.

Na figura 3.21 pode ver-se o equipamento NAS e um esquema do seu princípio de funcionamento [36].

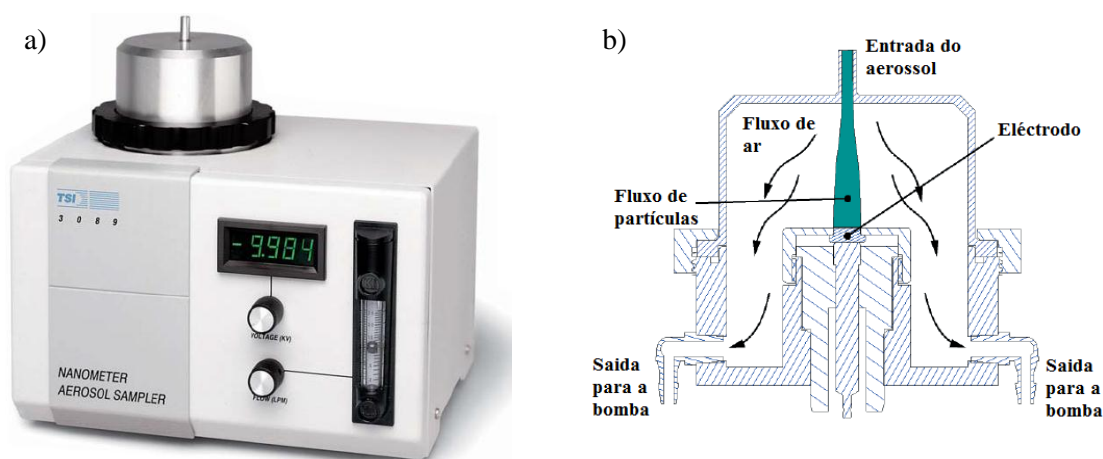


Figura 3.21: Amostrador de aerossóis nanométrico

a) *Nanometer Aerosol Sampler Model 3089* [36], b) Princípio de funcionamento do NAS [36].

3.5.4 Equipamento de medição de granulometria SMPS

Este equipamento permite medir a distribuição por tamanhos de partículas ultrafinas entre os 10 e os 487 nm, medição feita através da separação das partículas com base na sua mobilidade eléctrica. O modo de detecção de partículas de um tamanho seleccionado é realizado através da utilização de uma tecnologia óptica de detecção que permite aumentar as partículas através da sua condensação por álcool butílico. A separação das partículas é feita por um DMA (*Differential Mobility Size Analyzer*). O DMA selecciona as partículas através da distribuição da sua carga eléctrica, fazendo-as passar por um campo eléctrico onde as partículas de diferentes tamanhos são separadas. O DMA determina o diâmetro de mobilidade eléctrica das partículas. A contagem das partículas é feita por um contador de partículas condensadas (CPC) que realiza a contagem das partículas que foram aumentadas através da condensação, passando-as por um feixe laser. A difracção da luz das partículas é então detectada por um foto-detector.

Todo o sistema é automatizado e a análise de dados é feita por computador com um *software* específico da TSI [37].

Os resultados das análises realizadas pelo SMPS são apresentados em gráficos de escala logarítmica. A utilização desta escala não tem qualquer justificação teórica, deve-se apenas ao facto dos resultados serem apresentados numa escala de menor dimensão. Os gráficos mostram uma distribuição das concentrações do número das partículas por volume de ar ao longo de 64 canais que representam o diâmetro das partículas [38]. O SMPS utilizado neste estudo pertence ao Departamento de Engenharia Mecânica, da FCT-UC.

Na figura 3.22 pode-se ver o equipamento SMPS.



Figura 3.22: SMPS [39]

3.5.5 Microscópio electrónico de transmissão

O microscópio electrónico de transmissão TEM utilizado é da marca Hitachi, modelo H-8100 II de 200 kV. Possui um canhão de electrões por emissão térmica, equipado com um sistema de microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X (EDS), com um detector de elementos leves, e com aquisição digital de imagem através de uma câmara [40].

Na figura 3.23 pode-se ver uma fotografia do microscópio electrónico de transmissão do MicroLab do IST que foi utilizado neste trabalho.

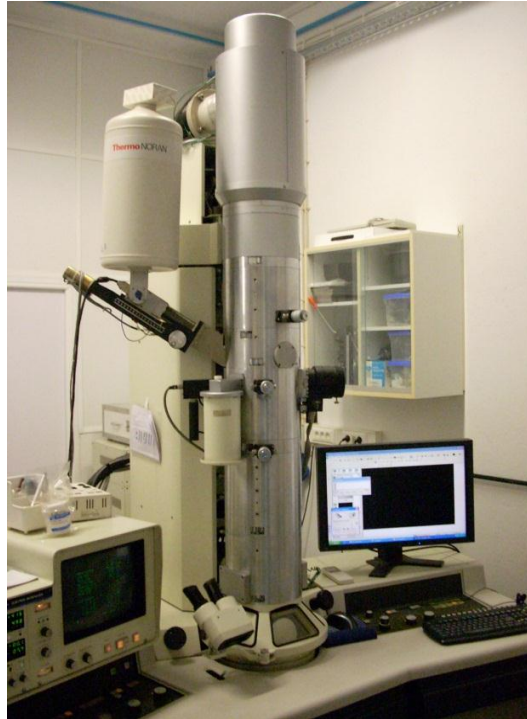


Figura 3.23: Microscópio electrónico de transmissão Hitachi H-8100 II

3.6 Procedimento experimental para processo de soldadura MAG

Realizaram-se cordões de soldadura para o processo de soldadura MAG, com os parâmetros pré-definidos que possibilitassem a recolha de amostras das nanopartículas libertadas e posteriormente a sua análise e caracterização.

A tabela 3.6 apresenta os parâmetros que se definiram como fixos para os ensaios do processo de soldadura MAG.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT, UNL. Todos os trabalhos foram realizados sem qualquer sistema de extracção de fumos e, por vezes, foram realizados ao mesmo tempo que outros trabalhos normais de um Laboratório de Tecnologia, simulando assim um ambiente de trabalho real.

Neste procedimento demonstra-se o plano dos ensaios e como estes foram realizados.

Tabela 3.6: Soldadura MAG, Fio sólido com protecção gasosa activa.

Parâmetros fixos	
Tipo de eléctrodo	AWS 5.18 er70s-6
Diâmetro (mm)	1
Espessura do material base a soldar (mm)	5
Fluxo de Gás (l/min)	15
Velocidade de soldadura (mm/min)	300
Comprimento do cordão de soldadura (mm)	450
Tempo de soldadura (s)	90

3.6.1 Ensaios experimentais do processo de soldadura MAG

Foram efectuados quatro conjuntos de ensaios com o processo de soldadura MAG, variando o gás de protecção e o modo de transferência de metal. A tensão de soldadura era ajustada automaticamente pela máquina de soldadura em função da velocidade de alimentação do fio. Os ensaios estão definidos na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Ensaios experimentais do processo de soldadura MAG

	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Ensaio4
Composição da Protecção Gasosa	Ar + 18% CO ₂	Ar + 8% CO ₂	Ar + 18% CO ₂	Ar + 8% CO ₂
Velocidade de alimentação do fio (m/min)	8	8	5	5
Modo de transferência	Globular	Globular	Spray	Spray

Para cada situação testada foi sempre realizada uma réplica de modo a obterem-se dados mais consistentes.

A composição das misturas gasosas foi escolhida de entre misturas industriais que gerassem maior taxa de formação de fumos, isto é, misturas com elevadas concentrações de dióxido de carbono e oxigénio [7]. A escolha dos modos de transferência deveu-se também às suas características para provocarem maiores taxas de formação de fumo e por serem os mais utilizados em MAG.

3.6.2 Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas

Com a utilização deste monitor foi possível obter as áreas de superfície das nanopartículas com capacidade de se depositarem nos pulmões mais propriamente nos alvéolos.

O monitor foi então colocado no modo (A), ou seja no modo que avalia apenas as nanopartículas com capacidade de deposição alveolar. Antes de se iniciarem as medições fez-se a calibração automática do equipamento.

As amostragens realizadas por este monitor foram definidas para serem analisadas e registadas de 10 em 10 segundos pelo *software* do equipamento. Este intervalo de tempo foi definido para evitar saturações do equipamento, visto este estar a analisar ambientes com grandes quantidades de partículas em suspensão.

Os cordões de soldadura foram sempre de 90 segundos, enquanto o tempo de amostragem do NSAM foi variando entre os 2 minutos e os 3 minutos para melhor se poder observar o impacto do processo de soldadura.

Por forma a ter uma melhor noção do impacto que a soldadura tem em todo o ambiente envolvente foram escolhidos 5 pontos de recolha a diferentes distâncias do posto de soldadura para o monitor de área de superfície de nanopartículas.

Um ponto, designado de ponto 4, foi a máscara do operador para obter dados relativamente ao que o operador vai inalar. Como este processo foi automatizado colocou-se a tomada de amostras, no braço da mesa que sustenta a tocha, ficando a 410 mm acima do banho de soldadura. Outro ponto utilizado para colocação da tomada de amostras foi na Hote que fica a 120 cm da bancada onde foram realizados os cordões de soldadura, designado ponto 5. Com este ponto é possível obterem-se dados em relação ao tipo de partículas que sobem com os fumos visíveis. As restantes tomas foram colocadas a 50, 100 e 300 cm do banho de soldadura designados por pontos 1, 2 e 3, respectivamente. Estes pontos serviram de indicadores do impacto no ambiente circundante à soldadura desde uma distância muito próxima como é a de 50 cm até à distância de 300 cm. Na figura 3.24 apresenta-se um esquema que ilustra a posição da tomada de amostras em relação à mesa de soldadura e ao chão.

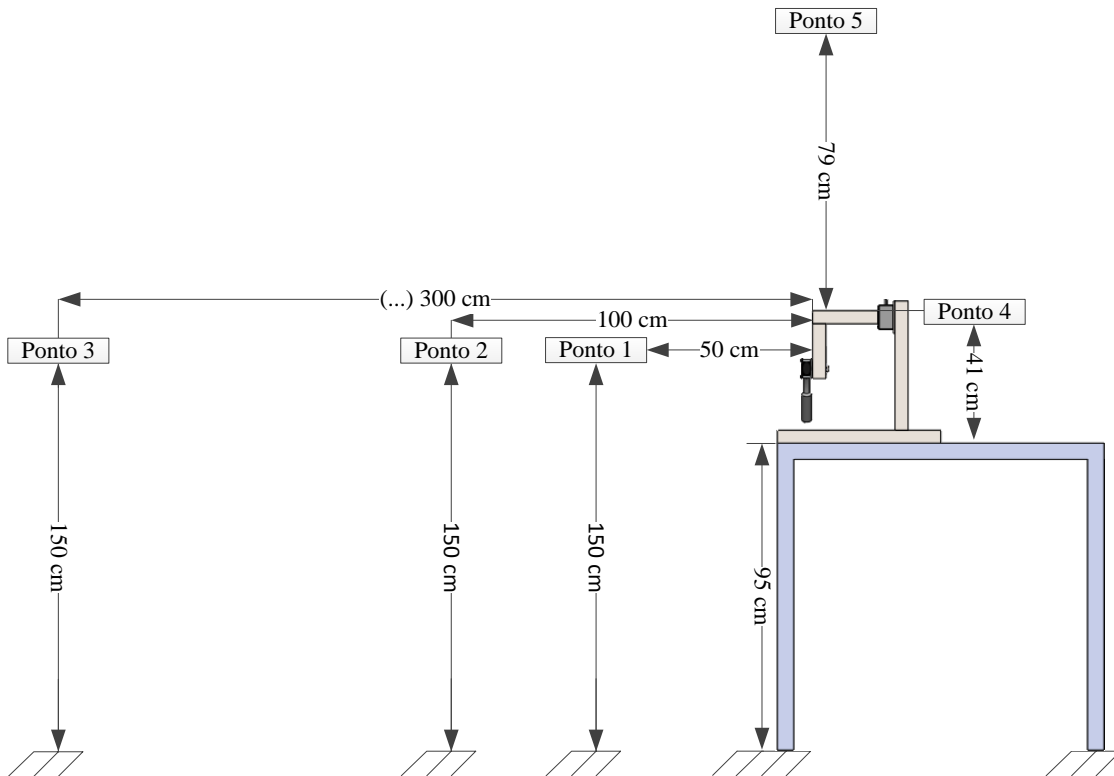


Figura 3.24: Esquema de pontos de recolha para o monitor de área de superfície de nanopartículas.

3.6.3 Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise em microscopia electrónica

O equipamento de recolha de partículas, NAS, foi colocado a uma distância constante durante todos os ensaios, mudando-se apenas a sua grelha quando se mudaram as misturas gasosas, para poder analisar a influência das misturas gasosas na composição e na morfologia das partículas libertadas.

No NAS os parâmetros que se podem controlar é o fluxo com que o equipamento recolhe as partículas suspensas no ar e a voltagem do precipitador electrostático. Os parâmetros utilizados foram os mesmos em todos os ensaios, a voltagem foi sempre aproximadamente 5 V e o fluxo foi sempre de 1,5 l/min.

Na figura 3.25 pode-se ver como a grelha é colocada no NAS, e a fita de carbono que fixa a grelha de cobre ao precipitador electrostático. Na figura 3.26 pode-se ver esquematicamente o ponto de recolha do equipamento NAS. Este ponto encontra-se no centro na mesa de soldar por cima da calha da manta corta-fogo.



Figura 3.25: Grelha de cobre no NAS

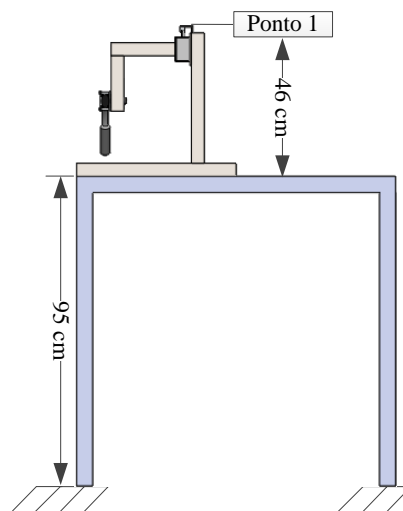


Figura 3.26: Esquema de tomada de amostras do NAS

As amostras recolhidas foram posteriormente analisadas por microscopia electrónica de transmissão (TEM), do Instituto Superior Técnico, com capacidade de microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X (EDS).

3.6.4 Recolha de amostras para medição no SMPS.

Antes de iniciar as medições com o SMPS foi necessário realizar a sua calibração automática e após isso deixou-se recolher amostras durante uma hora para se obter uma análise das concentrações de partículas no ambiente sem trabalhos de soldadura.

Por cada cordão realizado nos ensaios de SMPS o tempo de amostragem foi definido como 3 minutos e foi esse também o tempo de soldadura utilizado.

As medições realizadas com o SMPS foram realizadas sempre à mesma distância da mesa de soldar e com a sua tomada de amostras colocada atrás de uma máscara de soldador. Realizaram-se medições do SMPS para os quatro ensaios experimentais já especificados na tabela 3.7, de modo a poder-se obter uma relação entre os parâmetros operacionais do processo de soldadura

MAG e as concentrações das partículas e os seus diâmetros. Na figura 3.27 representa-se esquematicamente o ponto de recolha das medições com o SMPS em relação à mesa de soldar.

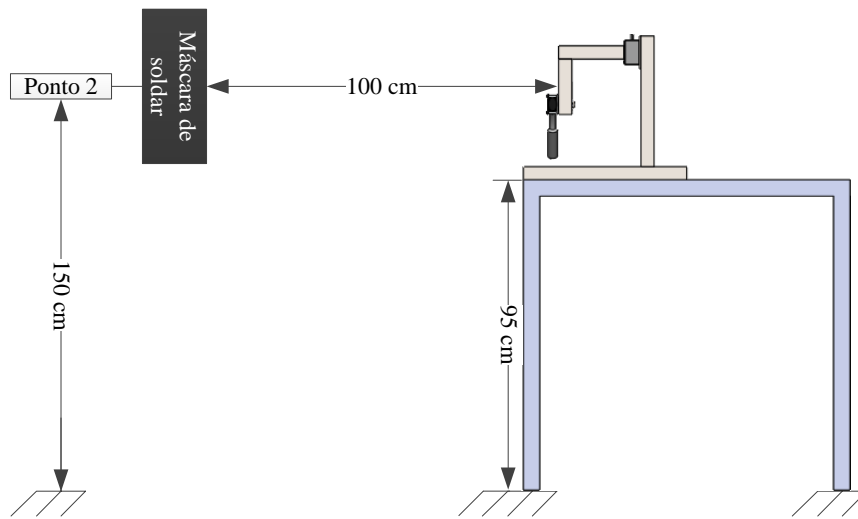


Figura 3.27: Esquema de tomada de amostras do SMPS

3.7 Procedimento experimental para o processo de soldadura SER

Os cordões de soldadura do processo SER foram realizados manualmente com parâmetros previamente definidos para a recolha de amostras e posterior análise e caracterização das nanopartículas libertadas.

Este procedimento foi aplicado no laboratório de tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da FCT, UNL. Todos os trabalhos foram realizados sem qualquer sistema de extracção de fumos e por vezes foram realizados ao mesmo tempo que outros trabalhos normais de um laboratório de tecnologia, simulando assim um ambiente de trabalho real.

Neste procedimento demonstra-se o plano dos ensaios e como estes foram realizados.

3.7.1 Caracterização dos eléctrodos utilizados

Foram utilizados dois tipos de eléctrodos revestidos nos ensaios de soldadura. Os dois tipos de eléctrodos escolhidos foram os eléctrodos Rutilícos e Básicos. Escolheram-se estes eléctrodos por serem dos mais utilizados e assim poderem demonstrar de uma forma mais genérica os efeitos do processo de soldadura por eléctrodos revestidos e também por este ensaio de soldadura ser realizado num material base de aço carbono que se encontra descrito na tabela 3.2. A especificação dos eléctrodos utilizados e as suas intensidades encontram-se na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Parâmetros do Processo de soldadura por eléctrodos revestidos

Parâmetros	
Características do eléctrodo	
Tipo de eléctrodo	Rutílico E6013/Básico E 7018-1
Comprimento (mm)	350
Espessura do material base a soldar (mm)	5
Intensidade (A)	90/70

3.7.2 Ensaio experimentais do processo de soldadura SER

Da mesma forma que se criaram ensaios diferentes de soldadura no processo de soldadura MAG foram também criados quatro ensaios diferentes para o processo de soldadura SER. Na tabela 3.9 estão os diferentes ensaios de soldadura onde foram utilizados dois tipos de eléctrodos a duas intensidades diferentes.

Tabela 3.9: Ensaios experimentais do processo de soldadura SER

	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Ensaio4
Tipo de eléctrodo	Rutílico E 6013	Rutílico E 6013	Básico E 7018-1	Básico E 7018-1
Intensidade (A)	70	90	70	90

3.7.3 Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas.

Como também foi explicado no processo de soldadura MAG, a utilização deste monitor possibilita a obtenção das áreas de superfície das nanopartículas com capacidade de deposição nos pulmões mais especificamente nos alvéolos.

As partículas que se pretendem analisar são as com capacidade de deposição alveolar e, por isso, o monitor foi colocado no modo (A), ou seja no modo alveolar. Antes de se iniciarem quaisquer medições fez-se a calibração automática do equipamento.

No processo de soldadura SER, as medições realizadas foram idênticas às do processo de soldadura MAG, ou seja, de 10 em 10 segundos pelo *software* do equipamento. Este intervalo de tempo foi assim definido para evitar saturações do equipamento, visto este estar a analisar ambientes com grandes quantidades de partículas em suspensão.

Como neste processo de soldadura os cordões foram realizados manualmente e as taxas de deposição do material variam com as intensidades de corrente, o tempo de soldadura não foi sempre o mesmo em todos ensaios. No entanto o tempo médio de soldadura para os eléctrodos Básicos a 90 A foi de 65 s e a 70 A foi de 74 s, para os eléctrodos Rutilícos o tempo médio de soldadura a 90 A foi de 54 s e a 70 A foi de 63 s. O tempo de amostragem do NSAM foi variando entre os 2 minutos e os 2,5 minutos para melhor se poder observar o impacto do processo de soldadura.

Como se pretende ter uma noção do impacto que a soldadura tem em todo o ambiente envolvente foram escolhidos seis pontos de recolha a diferentes distâncias da soldadura para o monitor de área de superfície de nanopartículas.

Dois pontos, designados de pontos 1 e 2, foram a máscara do operador: um dos pontos foi o interior da máscara e outro foi o exterior da máscara. Estes pontos permitem obter valores relativos às partículas inaladas pelo operador e às partículas que se encontram no ambiente junto às vias aéreas deste. Os pontos denominados de ponto 3, 4 e 5 foram pontos de tomada de partículas a 50 cm, a 100 cm e a 300 cm do banho de soldadura, respectivamente. Estes pontos vão servir de indicadores do impacto no ambiente circundante à soldadura desde uma distância muito próxima como é a de 50 cm até à distância de 300 cm. O último ponto, designado de ponto 6, representa uma tomada de amostras na *hotte*, com este ponto é possível obter dados resultantes dos fumos visíveis que sobem para a *hotte*. A figura 3.28 é um esquema que mostra a posição da tomada de amostras em relação à mesa de soldadura e ao chão.

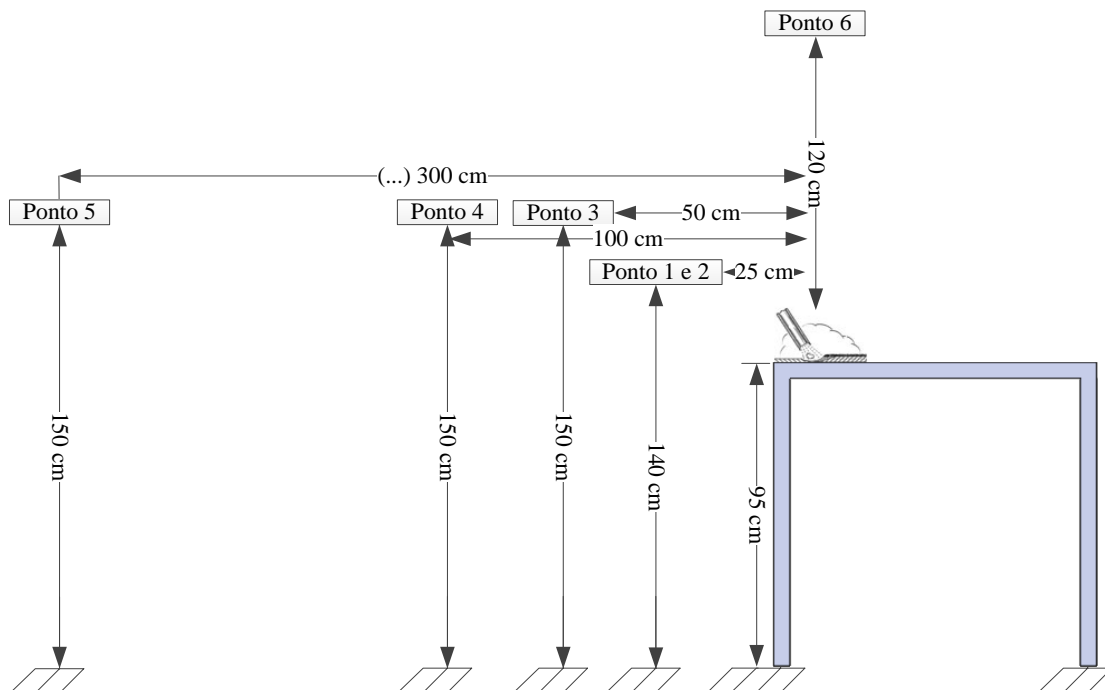


Figura 3.28: Esquema de pontos de amostragem do NSAM em SER

3.7.4 Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise de microscopia.

A utilização deste equipamento foi idêntica à explicada no capítulo 3.6.3 com a excepção do ponto de recolha, que no processo de soldadura MAG era colocado na própria mesa de soldadura e no processo de soldadura SER foi colocado num suporte tipo haste sendo mantido a 40 cm do banho de soldadura e a uma altura de 30 cm em relação à bancada de soldadura. Outra diferença entre a utilização do equipamento nos dois processos foi a colocação das grelhas que no processo de soldadura SER foram trocadas quando se mudou de tipo de eléctrodo, ou seja foram utilizadas duas grelhas, uma para eléctrodos rutilícos e outra para eléctrodos básicos. As amostras recolhidas foram analisadas da mesma forma que no processo de soldadura MAG.

3.8 Conclusões

Construiu-se uma mesa que permite fazer soldadura automática, realizaram-se ensaios de soldadura SER e MAG. Este procedimento experimental possibilitou realizar as recolhas e as análises necessárias às partículas de uma forma rigorosa e sistemática possibilitando, deste modo, validar os resultados provenientes deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados decorrentes do procedimento experimental, que são ainda analisados e discutidos. É neste capítulo que se descrevem os ensaios de quantificação das emissões de nanopartículas e se procura relacionar estas com alguns parâmetros característicos dos processos de soldadura. Apresentam-se, ainda, os resultados das caracterizações das nanopartículas recolhidas.

4.2 Objectivos

Este capítulo tem como principais objectivos fazer a análise das:

- Leituras realizadas pelo equipamento NSAM no processo de soldadura MAG e no processo de soldadura SER.
- Medições realizadas pelo SMPS no processo de soldadura MAG.

- Imagens de microscopia electrónica e o EDS das partículas recolhidas pelo NAS nos processos de soldadura SER e MAG.

4.3 Cálculo das entregas térmicas

Para melhor interpretar os efeitos dos processos de soldadura na libertação de nanopartículas calcularam-se as entregas térmicas através da equação 4.3.1.

$$E_t = \frac{I_c \cdot V_t \cdot t_s}{l_s} \cdot \eta \text{ [J/mm]} \quad (4.3.1)$$

em que:

I_c - Intensidade de corrente (A),

V_t - Tensão de arco (V),

t_s - Tempo de arco (s),

l_s - Comprimento da soldadura (mm),

η - Rendimento do processo.

Cálculo das entregas térmicas no processo de soldadura MAG

No capítulo 3.6.1 foram definidos quatro ensaios experimentais para o processo de soldadura MAG. Para cada um desses ensaios calculou-se a entrega térmica média dos ensaios de soldadura realizados.

Como o processo de soldadura MAG foi automatizado, a velocidade foi constante, e apenas a intensidade de corrente sofreu pequenas variações. A equação 4.3.1 pode ser adaptada para melhor se adequar a este processo.

Para o cálculo das entregas térmicas neste processo de soldadura aplicou-se a equação 4.3.2, onde:

v - Velocidade de soldadura (mm/min).

$$E_t = \frac{I \cdot V}{v} \cdot \eta \text{ [J/mm]} \quad (4.3.2)$$

A velocidade de soldadura foi a especificada no plano experimental conforme se indica na tabela 3.6, ou seja de 300 mm/min e o rendimento deste processo foi admitido como sendo de 80 % de acordo com a norma DIN 1011-1 [41], rendimentos comuns para processos de soldadura MAG e tendo em conta que não se está a realizar mesmo uma soldadura mas sim uma deposição de material fundido.

Na tabela 4.1 apresentam-se os valores médios das intensidades de corrente, tensões e entregas térmicas de cada um dos quatro ensaios experimentais.

Tabela 4.1: Entrega térmica no processo de soldadura MAG

	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Ensaio4
Tensão (V)	22,52	22,56	22,53	22,57
Intensidade de Corrente (A)	132,1	131,7	181,9	172
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,48	0,48	0,66	0,62

As misturas gasosas na entrega térmica não provocam grandes alterações. No entanto, os modos de transferência apresentam maiores entregas térmicas quando se utiliza o modo de transferência *spray*. O ensaio 3, que é o ensaio experimental com a mistura gasosa de Ar + 18 % CO₂ e modo de transferência *spray* foi o que teve uma maior entrega térmica média.

Cálculo das entregas térmicas no processo de soldadura SER

No plano experimental do processo de soldadura SER foram definidos 4 ensaios experimentais, como se pode ver na tabela 3.9. Para cada um destes ensaios foram também calculadas as entregas térmicas médias usando a equação 5.3.1. As intensidades de soldadura foram as indicadas na tabela 3.9 e o rendimento admitido para o cálculo das entregas térmicas na tabela 4.2 foi de 80 % [41].

Tabela 4.2: Entrega Térmica no processo de soldadura SER

	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Ensaio4
Tempo de soldadura (s)	67,5	53	74,17	66
Tensão (V)	25,92	29,92	24,83	25,00
Comprimento (mm)	100	100	100	100
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,98	0,71	0,64	0,74

Como se pode ver na tabela 4.2 os ensaios com maior entrega térmica foram os com maiores intensidades de corrente (90 A) e, destes o que teve maior entrega térmica média foi o eléctrodo revestido básico.

4.4 Resultados do NSAM no processo de soldadura MAG

Como foi descrito no capítulo 3.6, a recolha de partículas foi efectuada em cinco pontos diferentes e para quatro ensaios distintos. As medições realizadas pelo NSAM apresentam-se em gráficos que demonstram a variação das áreas de superfície das partículas por volume pulmonar, a diferentes distâncias da fonte de emissão. Foram efectuados gráficos relativos aos resultados obtidos com o NSAM para cada um dos ensaios.

4.4.1 Ensaio 1

No capítulo 3.6.1 pode-se ver que o ensaio 1 é o ensaio experimental com o modo de transferência globular e a mistura gasosa de Árgon com 18 % de dióxido de carbono. Nas figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se os valores médios entre o ensaio e a sua réplica nas medições do NSAM para este ensaio, às distâncias referidas na figura 3.24.

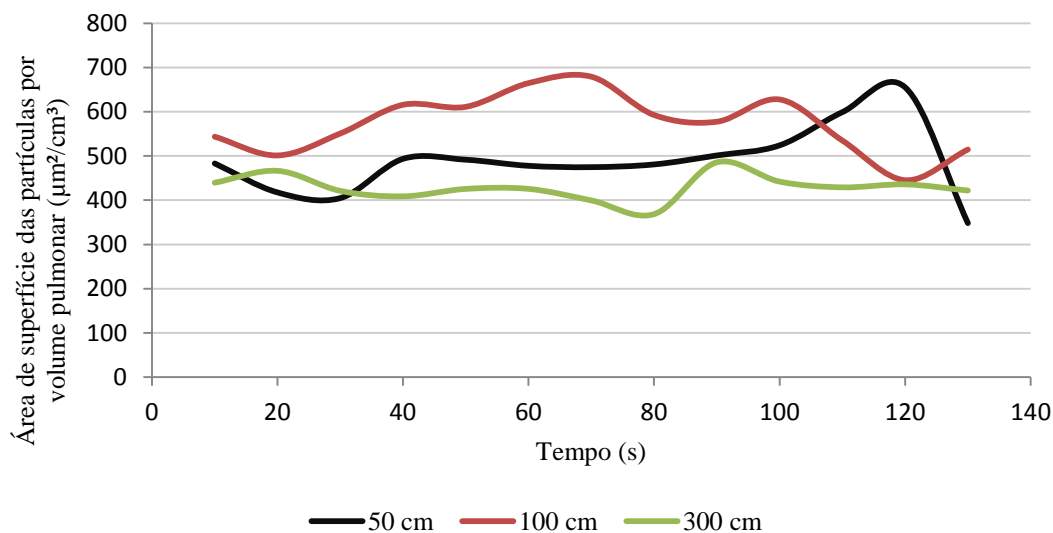


Figura 4.1: Ensaio 1, transferência globular com mistura gasosa Ar+18% CO₂a 50 cm, 100 cm e 300 cm.

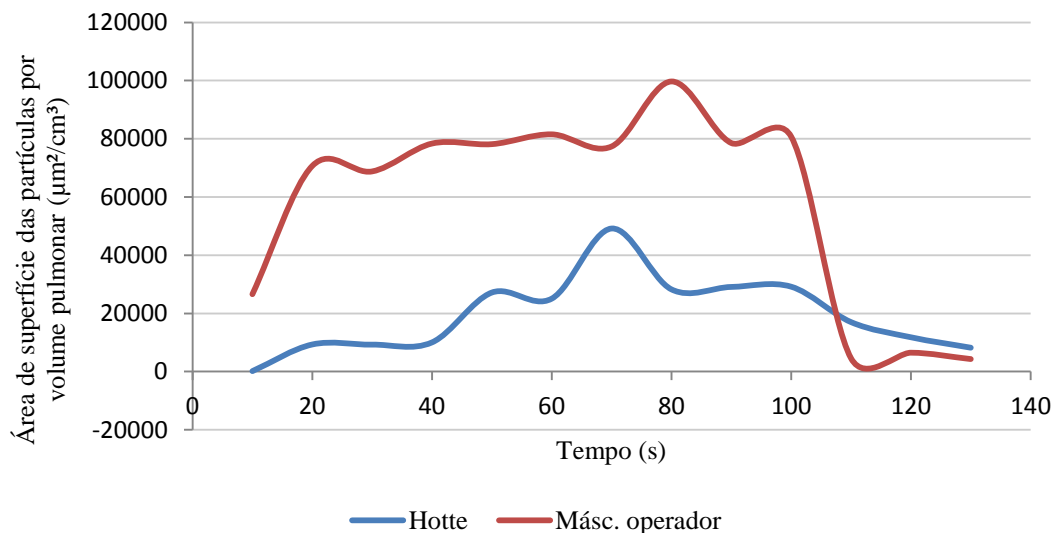


Figura 4.2: Ensaio 1, transferência globular com mistura gasosa Ar+18% CO₂na hotte e máscara do operador.

Para estes parâmetros e condições de soldadura, o maior valor da área superficial de partícula com capacidade de deposição alveolar por cm^3 de ar é de 99697 μm^2 no ponto da máscara do operador.

Em cada um dos pontos de amostragem foram sempre realizadas medições das áreas de depositadas das partículas, antes e depois de cada ensaio de soldadura assim como antes e depois das réplicas. Estas medições estão representadas no gráfico da figura 4.3 onde se podem observar as medições para cada um dos pontos ao longo do tempo.

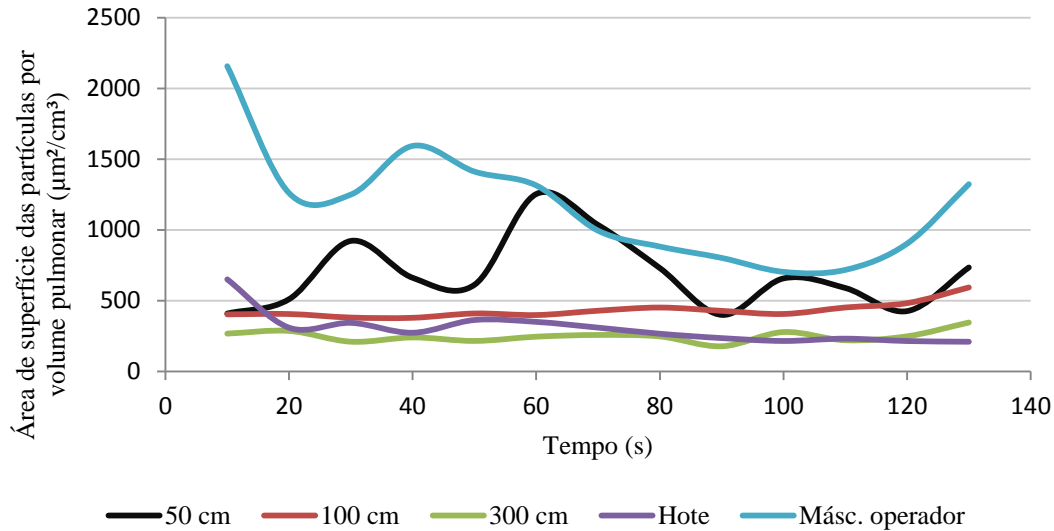


Figura 4.3: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio1.

O gráfico da figura 4.3 apresenta valores que, inicialmente, não eram esperados nas medições das distâncias de 50 cm e na *hote*. Estes valores são valores de medições no ar ambiente, superiores aos valores das medições durante o processo de soldadura e são resultado de uma elevada concentração de partículas, que não tiveram o tempo necessário para serem depositadas e ainda vieram a aumentar mais, devido a outros trabalhos a decorrer durante a amostragem das partículas.

O gráfico da figura 4.4 mostra a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Com este gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

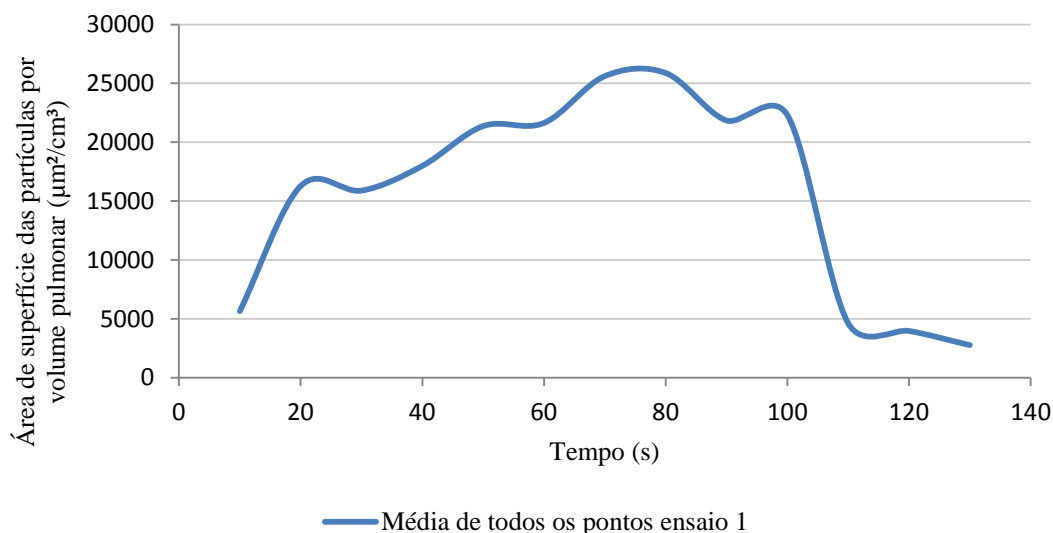


Figura 4.4: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio1

No gráfico da figura 4.4 o valor máximo medido é de $25878 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

4.4.2 Ensaio 2

O ensaio 2 foi indicado na tabela 3.7 como um processo de soldadura com um modo de transferência globular e uma mistura gasosa de Ar + 8 % CO_2 . Os gráficos das figuras 4.5 e 4.6 apresentam valores médios entre o ensaio e réplica das medições realizadas com o NSAM das áreas de superfície das partículas ao longo do tempo de soldadura, para os vários pontos definidos no plano experimental.

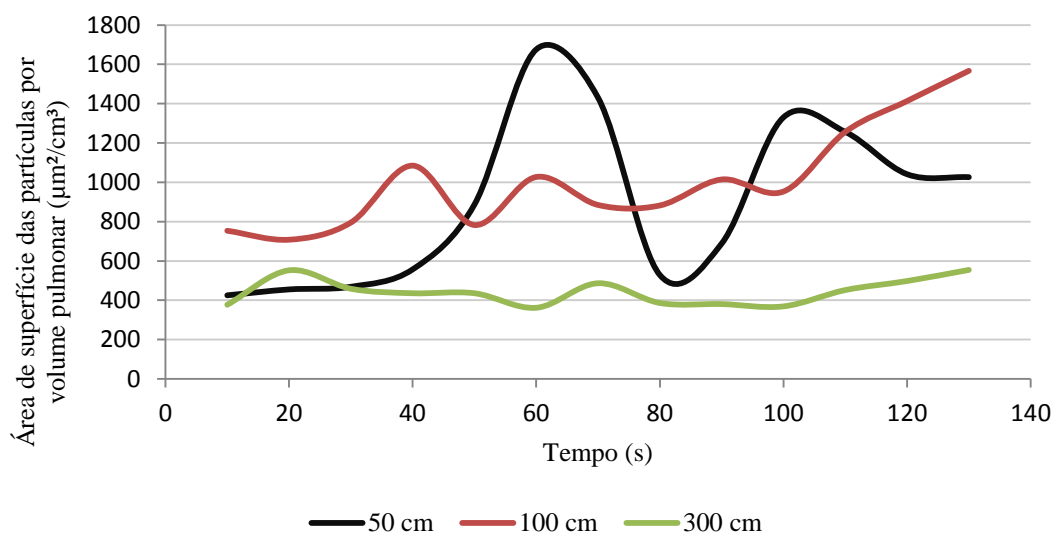


Figura 4.5: Ensaio 2, transferência globular com mistura gasosa Ar+8% CO_2 a 50 cm, 100 cm e 300 cm.

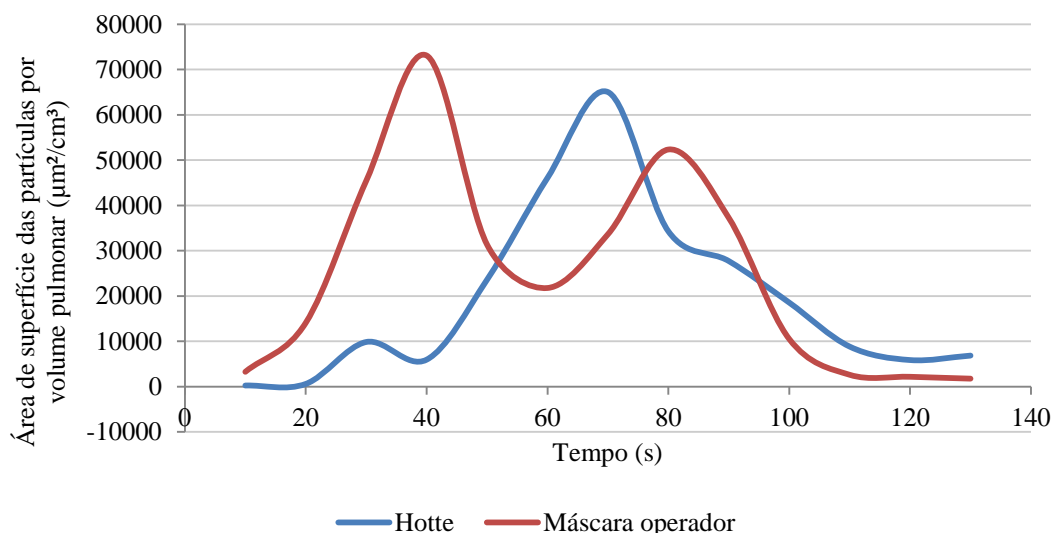


Figura 4.6: Ensaio 2, transferência globular com mistura gasosa Ar+8% CO₂ na *hotte* e máscara do operador

Nos gráficos do ensaio 2, a maior área de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar foi de 73086 μm^2 no ponto de recolha da máscara do operador. Na figura 4.5 verifica-se que as áreas superficiais tendem a diminuir com o aumento da distância de amostragem em relação à fonte de emissão.

Na figura 4.7 apresentam-se os valores médios das medições realizadas com o NSAM no ambiente, antes dos ensaios e das réplicas dos ensaios no ensaio experimental 2. Este gráfico em comparação com o do ensaio precedente, permite ter uma melhor noção dos tempos de deposição das partículas em suspensão.

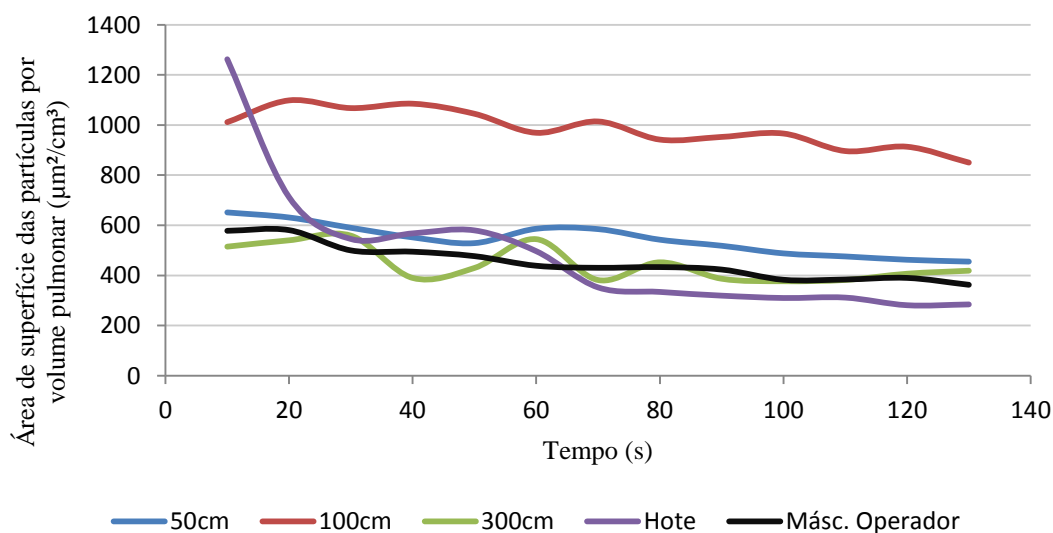


Figura 4.7: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 2

Na figura 4.8 apresenta-se a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Com este gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

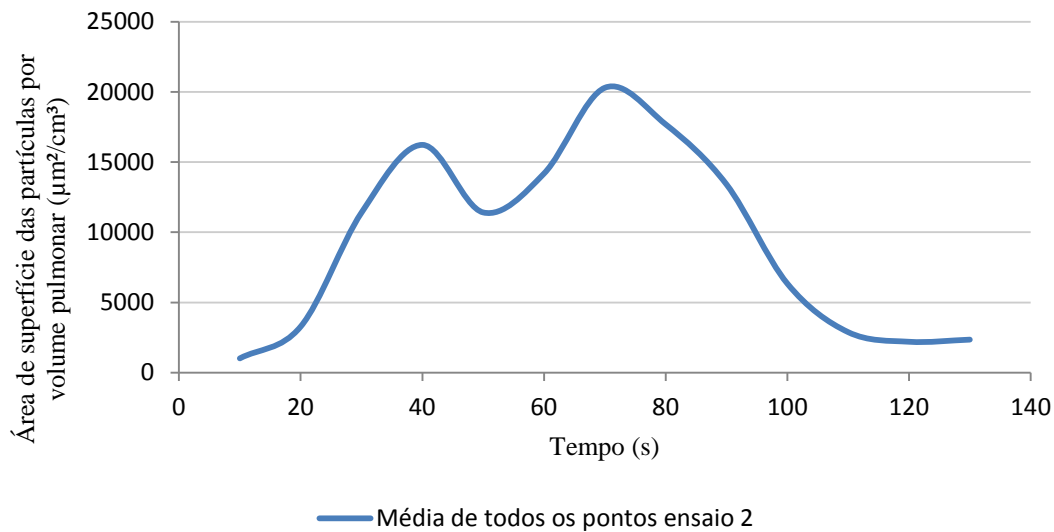


Figura 4.8: Média de todos os pontos de amostragem Ensaio 2

Na figura 4.8 o valor máximo é de $20291 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

4.4.3 Ensaio 3

O ensaio 3 foi indicado na tabela 3.7 como um processo de soldadura com um modo de transferência globular e uma mistura gasosa de Ar + 18 % CO_2 . As figuras 4.9 e 4.10 apresentam valores médios entre o ensaio e a réplica das medições realizadas no NSAM das áreas de superfície das partículas ao longo do tempo de soldadura para os vários pontos definidos no plano experimental.

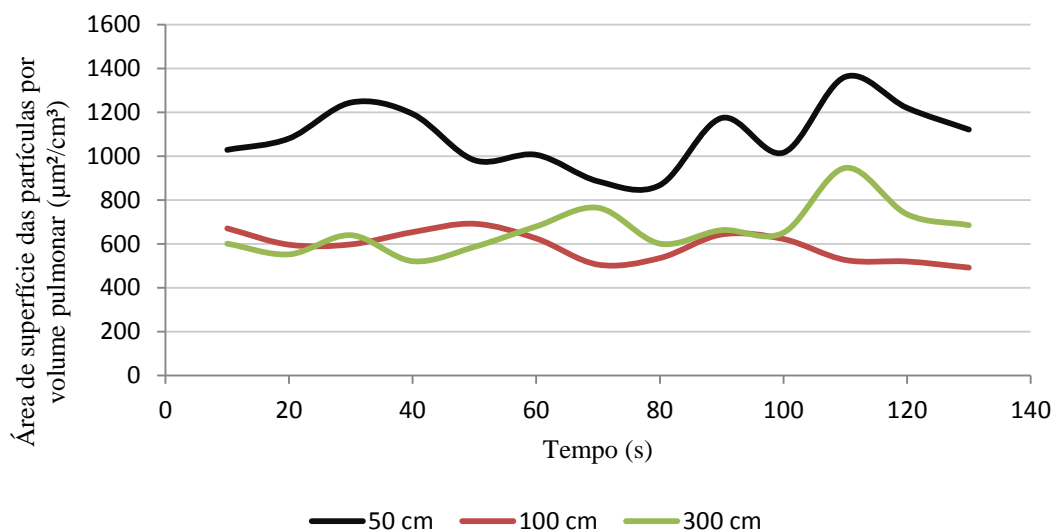


Figura 4.9: Ensaio 3, transferência *spray* com mistura gasosa Ar+18 % CO_2 a 50 cm, 100 cm e 300 cm.

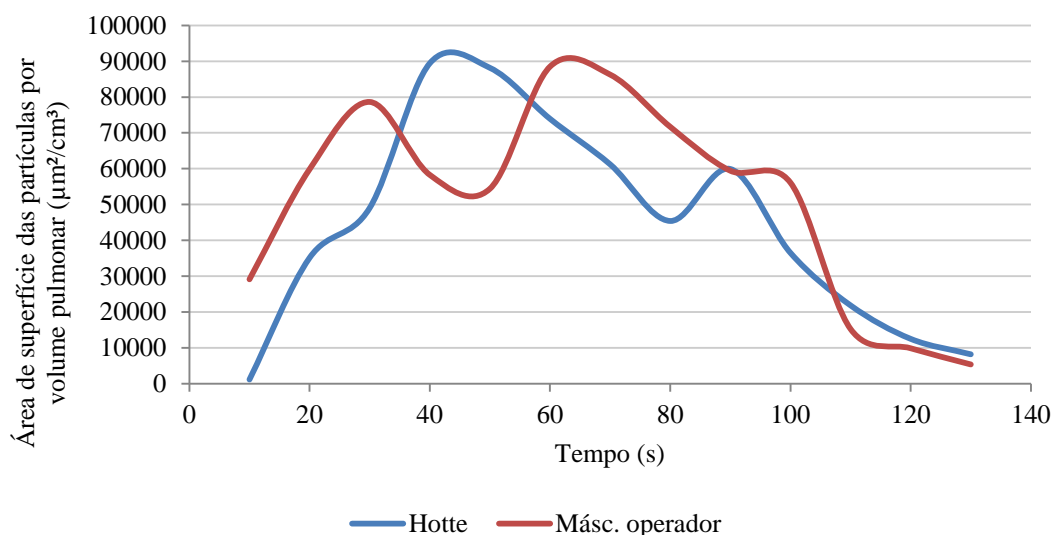


Figura 4.10: Ensaio 3, transferência *spray* com mistura gasosa Ar+18 % CO_2 na *hotte* e máscara do operador.

Nas figuras 4.9 e 4.10 pode observar-se a variação das dimensões das áreas das partículas ao longo do tempo e do processo de soldadura. É necessário destacar o facto de a amostragem a 300 cm da fonte ter áreas superiores ao ponto de amostragem a 100 cm. Este facto deve-se à grande quantidade de ensaios que precederam estas amostragens e a, mais uma vez, o tempo necessário para a deposição das partículas ser superior ao que se esperava inicialmente, ficando assim grandes concentrações de nanopartículas em suspensão no ar.

Na figura 4.10 a maior área de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar, medida foi de 89428 μm^2 na *hotte*.

Na figura 4.11 observam-se as medições no ambiente antes dos ensaios de soldadura e respectivas réplicas. Estas medições ilustram a situação referida anteriormente do tempo de

deposição das partículas: durante estas amostragens não houve quaisquer ensaios de soldadura. No entanto, existiam trabalhos no mesmo laboratório em simultâneo com a realização destas amostragens. Por isso as medições das áreas de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar chegam a atingir valores superiores aos das medições durante os ensaios de soldadura.

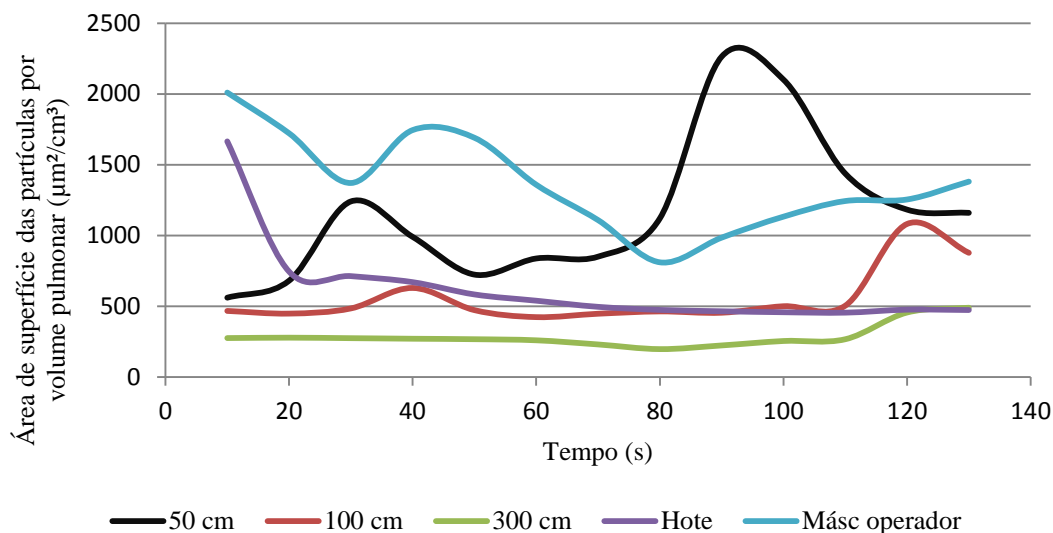


Figura 4.11: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 3.

Na figura 4.11 a linha da amostragem a 50 cm tem um pico que não deve ser considerado como resultado do processo de soldadura, mas sim como uma interferência do ambiente do laboratório, interferência esta normal para um local onde trabalham em simultâneo várias pessoas.

Na figura 4.12 apresenta-se a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Neste gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

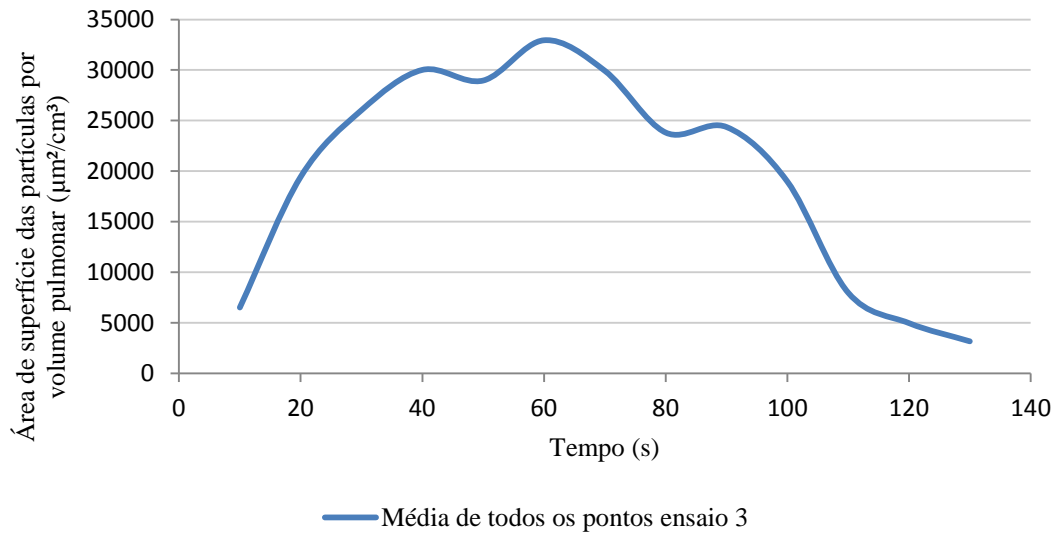


Figura 4.12: Média de todos os pontos de amostragem Ensaio 3

No gráfico da figura 4.12 o valor máximo é de $32946 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

4.4.4 Ensaio 4

O ensaio 4 foi indicado na tabela 3.7 como um processo de soldadura com um modo de transferência globular e uma mistura gasosa de Ar + 8 % CO_2 . As figuras 4.13 e 4.14 apresentam valores médios entre o ensaio e a réplica das medições realizadas com o NSAM das áreas superficiais das partículas ao longo do tempo de soldadura para os vários pontos definidos no plano experimental.

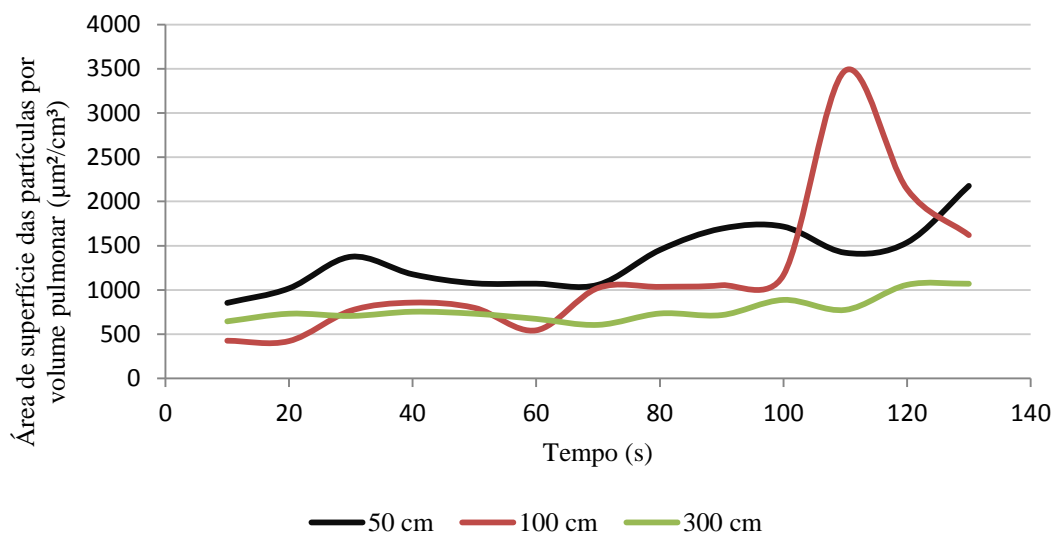


Figura 4.13: Ensaio 4, transferência *spray* com mistura gasosa Ar+8 % CO₂ a 50 cm, 100 cm e 300 cm.

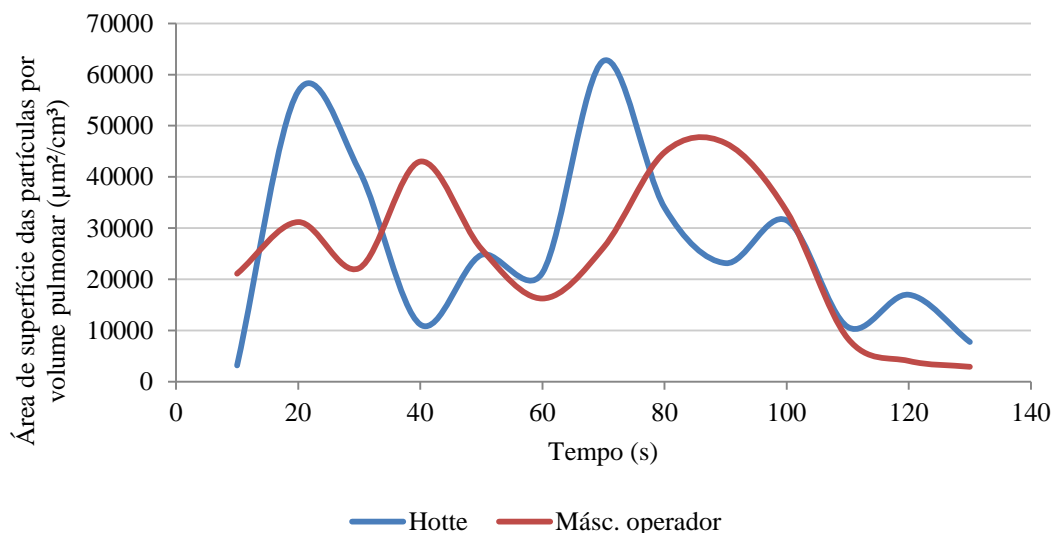


Figura 4.14: Ensaio 4, transferência *spray* com mistura gasosa AR+8 % CO₂ na *hotte* e máscara do operador

No ensaio 4 a maior área de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar foi de 62685 μm^2 , no ponto de recolha na *hotte*. Na figura 4.13 observa-se um pico à distância de 100 cm superior às medições realizadas a 50 cm. Esta situação é resultado de uma grande concentração de nanopartículas que foram recolhidas no ponto de amostragem no fim do processo de soldadura.

Na figura 4.15 apresentam-se os valores médios das medições realizadas com o NSAM no ambiente, antes dos ensaios e das réplicas no ensaio 4.

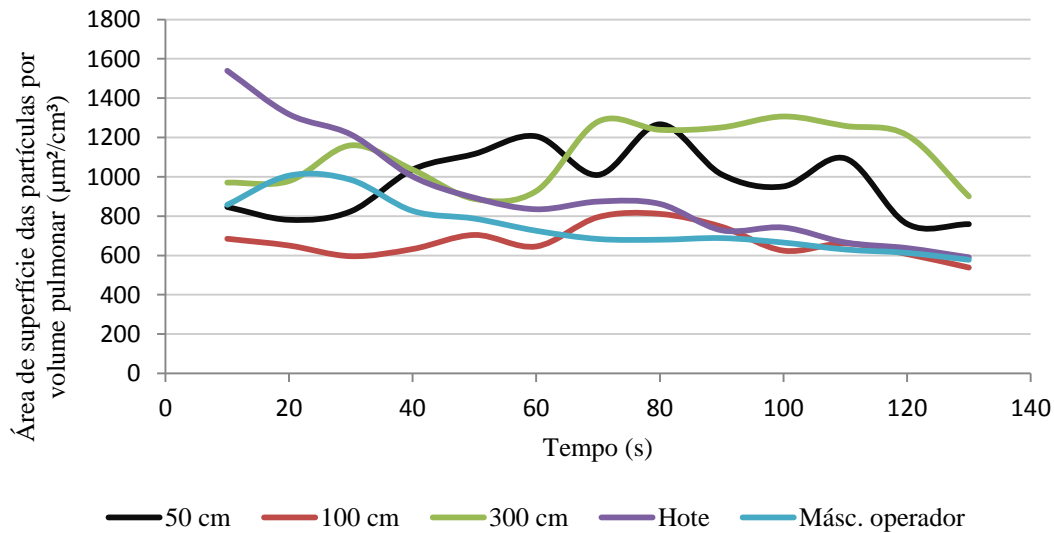


Figura 4.15: Medição com NSAM no ambiente antes dos ensaios e réplicas nos vários pontos do ensaio 4.

A figura 4.15 ilustra a situação já referida dos tempos necessários à deposição das nanopartículas em suspensão no ambiente do laboratório.

Na figura 4.16 apresenta-se a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Neste gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

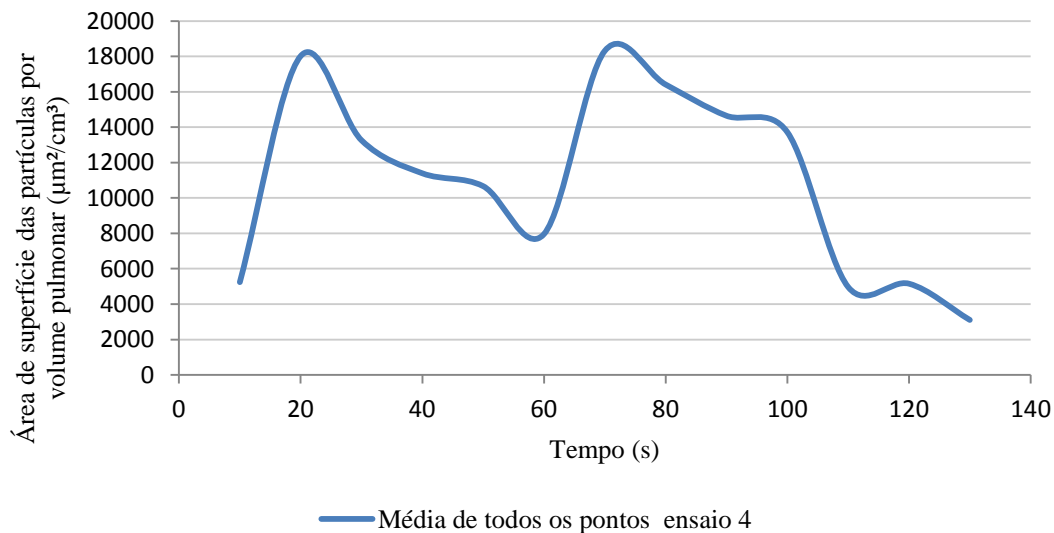


Figura 4.16: Média de todos os pontos de amostragem do ensaio 4

Na figura 4.12, o valor máximo é de $18314 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

4.4.5 Discussão dos resultados do NSAM no processo de soldadura MAG

Estes ensaios de soldadura tiveram sempre a duração de 90 s e as medições coincidiram sempre com o início do processo de soldadura. Nestes gráficos é possível observar picos que correspondem à chegada das partículas resultantes do processo ao equipamento e pode verificar-se que, mesmo quando o processo de soldadura termina, as partículas continuam suspensas no ar durante algum tempo. Nos gráficos das medições realizadas no ambiente antes e depois de cada cordão realizado ocorrem decréscimos ao longo do tempo de medição das áreas de superfície das partículas o que, por vezes, se demonstra lento e com um tempo superior ao das medições. Esta situação deve-se, muitas vezes, a ainda existirem partículas em suspensão no ar decorrentes de ensaios experimentais anteriores. Estas partículas que com, o tempo, começam a depositar-se, têm diferentes comportamentos dependendo do número de ensaios de soldadura que tenham antecedido as medições.

O primeiro pico que se pode observar nas figuras, para as várias distâncias, representa o momento em que o monitor detecta as nanopartículas e a queda acentuada que, por vezes, se observa logo após esse pico, deve-se a uma saturação do monitor, o que provoca uma falha na leitura do valor de partículas. Estas quedas nas leituras, após picos elevados não devem ser consideradas como resultado do processo de soldadura, mas sim como uma anomalia no funcionamento do monitor de área de superfície de nanopartículas.

Fazendo uma análise aos resultados é possível verificar qual a mistura gasosa e o modo de transferência que provoca emissões de nanopartículas com maiores áreas de superfície por volume pulmonar. Comparando o ensaio 1 com o ensaio 3, e o ensaio 2 com o ensaio 4 é possível identificar qual o modo de transferência responsável pelas maiores áreas de superfície das nanopartículas. Para os ensaios 1 e 3, onde apenas o modo de transferência diverge, comparando a figura 4.1 com a figura 4.9, observa-se que existem áreas de superfície de nanopartículas com maior dimensão na figura 4.9 no ensaio 3. No entanto, para pontos mais próximos da fonte como a *hotte* e a máscara do operador, os resultados invertem-se, ou seja, para estes dois pontos é o ensaio 3 que apresenta áreas de superfície superiores das nanopartículas. A comparação entre os ensaios 2 e 4, onde também apenas os modos de transferência são diferentes, apresenta resultados análogos aos ensaios 1 e 3. As áreas de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar vão ser maiores no ensaio 4, excepto nos pontos mais próximos da fonte, como se tinha verificado para os ensaios 1 e 3. Podem também comprar-se os ensaios 1 e 2 com os ensaios 3 e 4, onde a composição da mistura gasosa é o parâmetro que difere. Através dos gráficos com as médias de todos os pontos pode verificar-se que a mistura gasosa mais oxidante, Ar+18 % CO₂, é a que, em média, apresenta as

maiores áreas de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

4.5 Resultados do NSAM no processo de soldadura SER

4.5.1 Ensaio 1

No ponto 3.7.2 referiu-se que o ensaio 1 é o ensaio experimental com eléctrodo rutílico a 70 A. Os ensaios e as réplicas deste ensaio tiveram uma duração média de aproximadamente 68 s.

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam os valores médios entre o ensaio e a réplica das medições com o NSAM para este ensaio nas distâncias indicadas no esquema da figura 3.28.

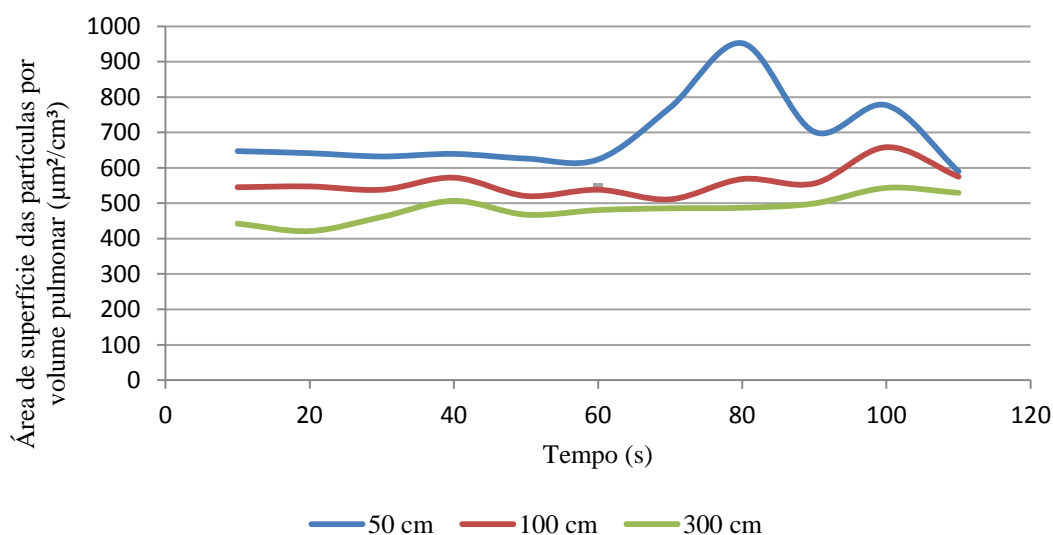


Figura 4.17: Eléctrodo Rutílico 70 A a 50 cm, 100 cm, 300 cm.

Na figura 4.17 pode verificar-se que as áreas de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar diminuem com o aumentar da distância à fonte de emissão.

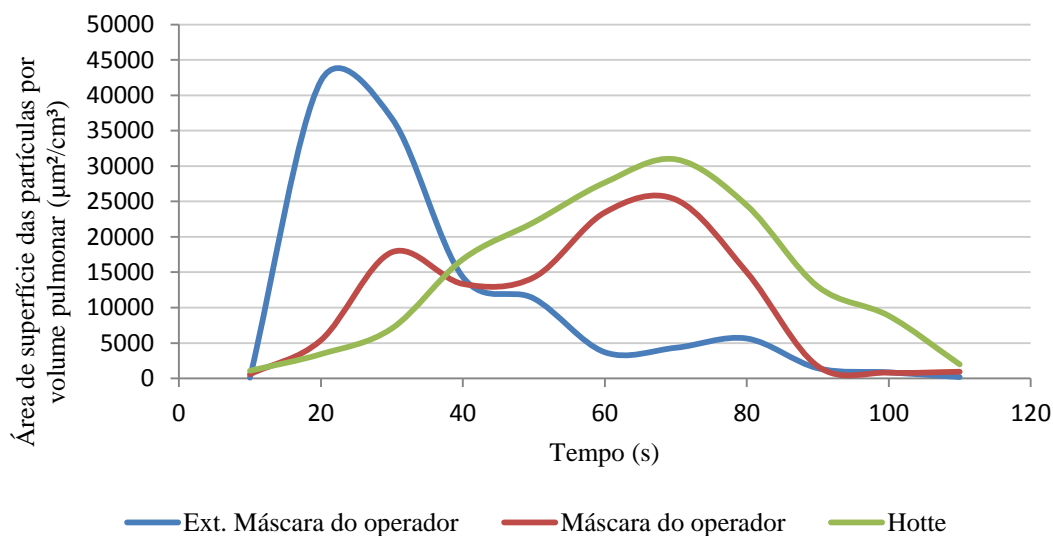


Figura 4.18: Eléctrodo Rutílico 70 A no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na *hotte*.

Na figura 4.18 o maior valor de área de superfície por volume pulmonar para o ensaio 1 ocorre, no exterior da máscara do operador, neste ponto a área de superfície das partículas por volume pulmonar atinge o valor de $42043 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na figura 4.19 apresentam-se as medições realizadas no ambiente antes de cada um dos ensaios e de cada uma das réplicas desses mesmos ensaios.

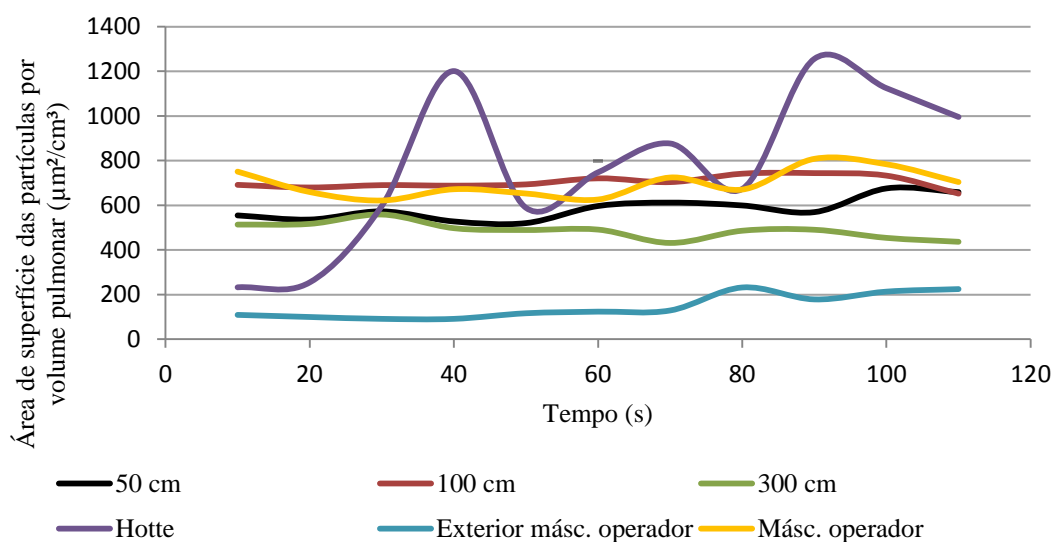


Figura 4.19: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 1.

Na figura 4.19 as linhas correspondem a um comportamento estável e linear, à excepção da linha que representa as medições na *hotte*. Esta apresenta dois picos que ultrapassam o valor de

1200 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. No entanto, são valores muito abaixo dos medidos durante o processo de soldadura.

A figura 4.20 apresenta a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Neste gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

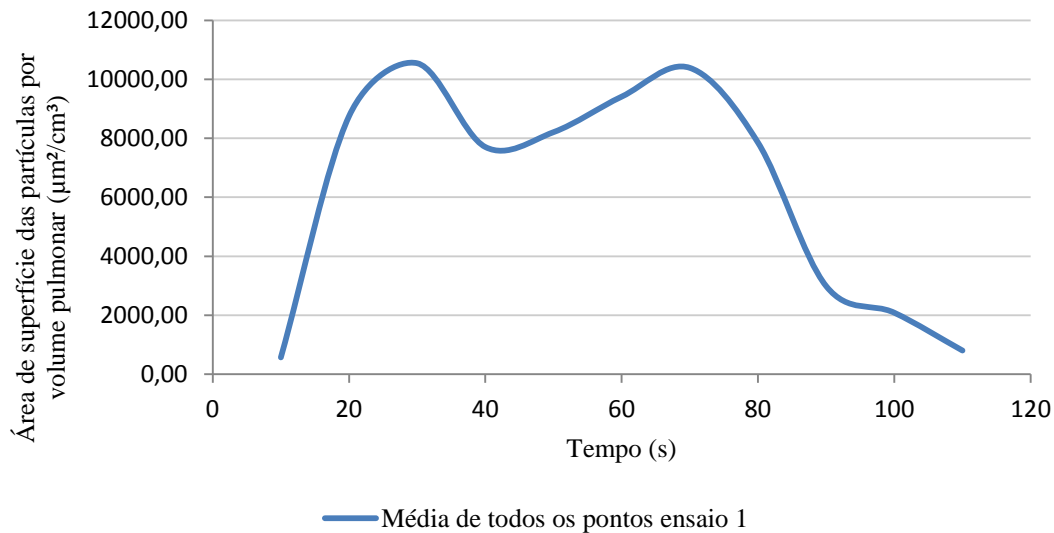


Figura 4.20: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 1

Na figura 4.20 o valor máximo é de 10544 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

4.5.2 Ensaio 2

O ensaio 2 foi indicado na tabela 3.9 como um processo de soldadura com eléctrodos revestidos rutilícos e com uma intensidade de corrente de 90 A. Os ensaios e as réplicas deste ensaio tiveram uma duração média de 53 s.

Nas figuras 4.21 e 4.22 apresentam-se valores médios entre o ensaio e a réplica das medições realizadas com o NSAM das áreas de superfície das partículas ao longo do tempo de soldadura para os vários pontos definidos no plano experimental.

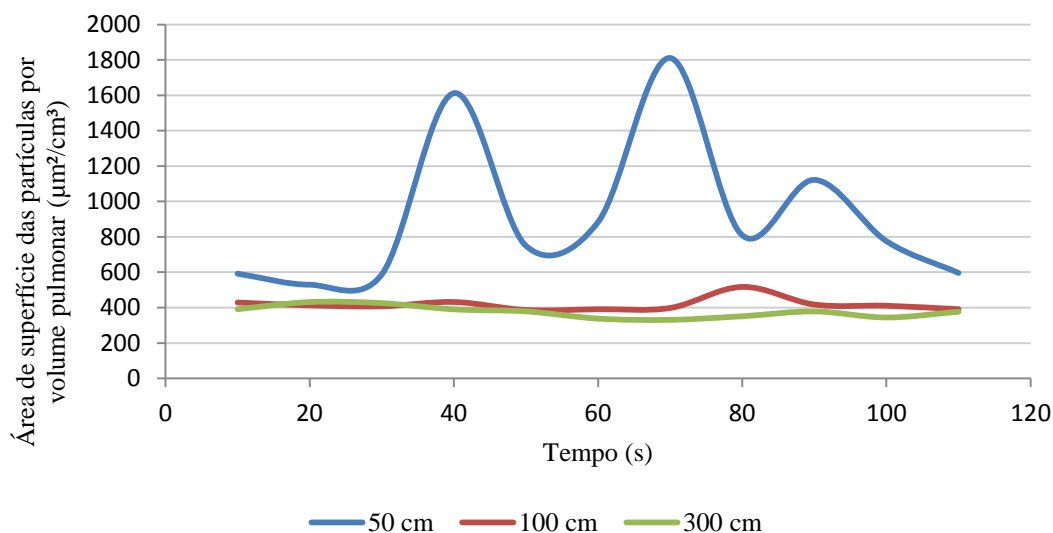


Figura 4.21: Eléctrodo Rutílico 90 A a 50 cm, 100 cm, 300 cm.

Na figura 4.21 pode observar-se uma grande diferença de valores das áreas de superfície entre os 50 cm e as distâncias de 100 cm e 300 cm. Os dois picos correspondentes à distância de 50 cm em condições ideais não existiriam. No entanto, este processo sendo um processo de soldadura manual apresenta sempre variações que não são passíveis de prever ou de controlar.

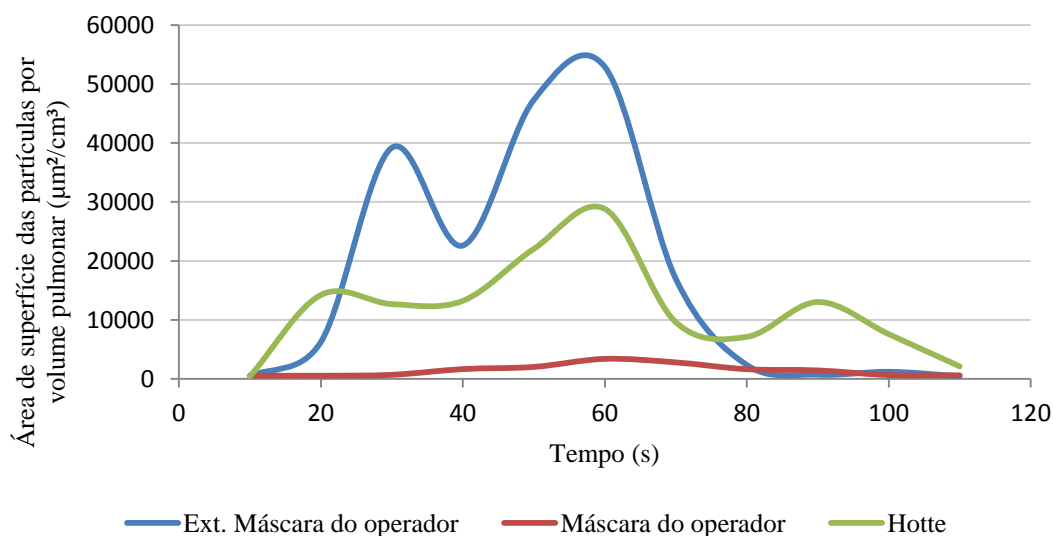


Figura 4.22: Eléctrodo Rutílico 90 (A) no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na hotte.

Na figura 4.22 o maior valor medido para este ensaio foi de $52892 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ no exterior da máscara do operador.

Na figura 4.23 apresentam-se as medições realizadas no ambiente antes de cada um dos ensaios e de cada uma das réplicas desses mesmos ensaios.

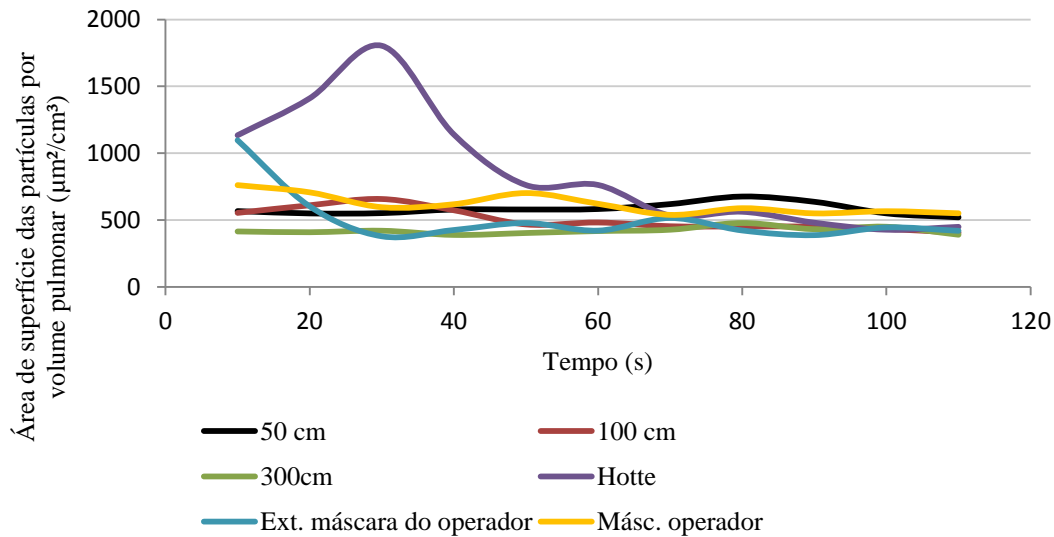


Figura 4.23: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 2.

À semelhança do que se observou no gráfico das medições do ambiente no ensaio 1, no ensaio 2 é também nas amostragens efectuadas na *hotte* que se tem o maior valor, neste ensaio de cerca de $1800 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na figura 4.24 apresenta-se a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Neste gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

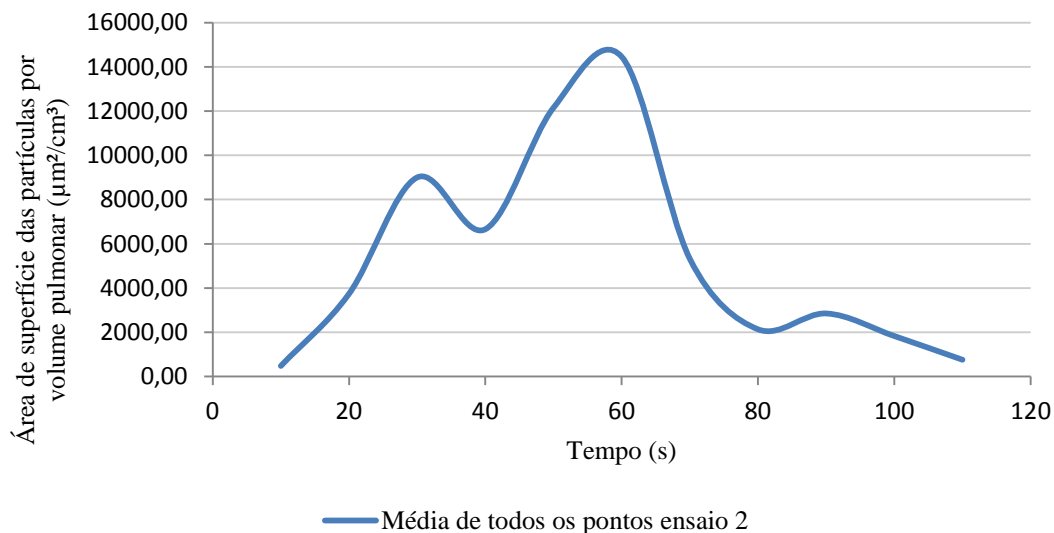


Figura 4.24: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 2.

Na figura 4.24 o valor máximo é de $14455 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

4.5.3 Ensaio 3

Este ensaio experimental corresponde às amostragens realizadas nos pontos indicados na figura 3.28 para o processo de soldadura por eléctrodos revestidos básicos, com uma intensidade de corrente de 70 A. Os ensaios e as réplicas realizados neste ensaio tiveram uma duração média de aproximadamente 74 s

Nas figuras 4.25 e 4.26 representam-se as médias das medições realizadas nos ensaios e réplicas para todos os pontos de amostragem.

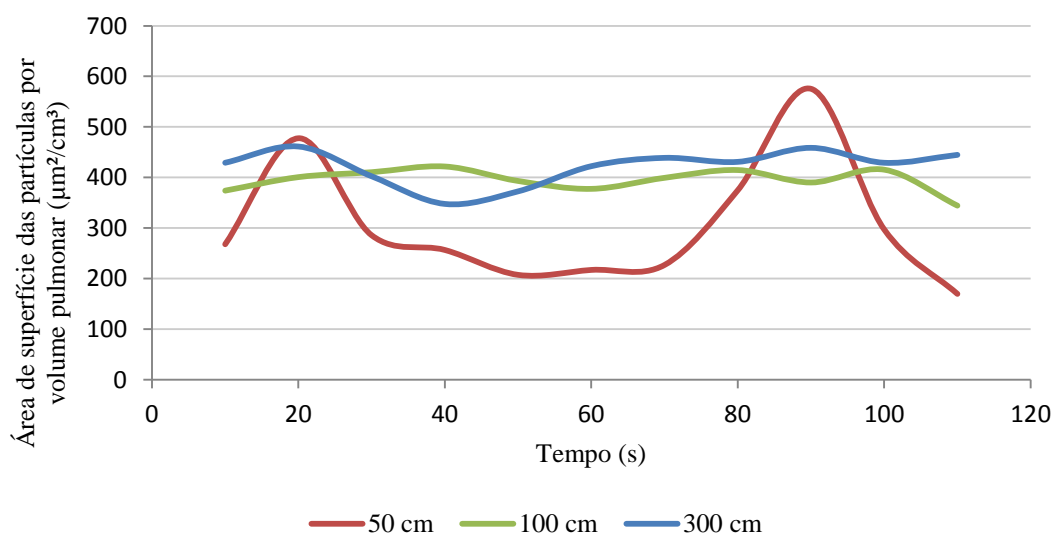


Figura 4.25: Eléctrodo Básico 70 A a 50 cm, 100 cm, 300 cm.

Na figura 4.25 pode observar-se a evolução das áreas de superfície por volume pulmonar das partículas com capacidade de deposição alveolar ao longo do tempo de soldadura que, neste ensaio, foi, em média, 74 segundos.

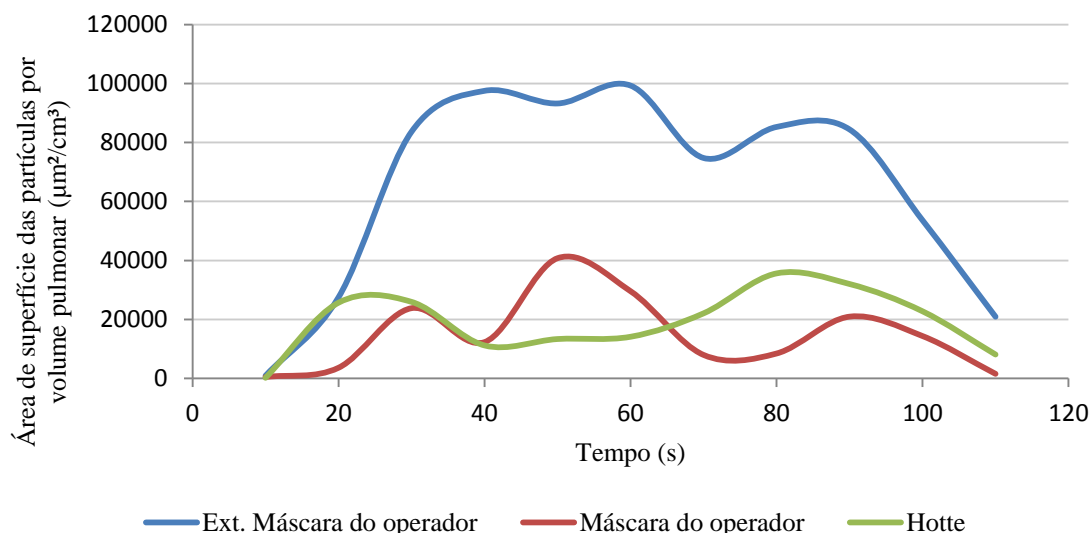


Figura 4.26: Eléctrodo Básico 70 (A) no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na *hotte*.

Na figura 4.26 apresentam-se as medições para os pontos do exterior da máscara do operador, do interior da máscara do operador e da *hotte* e mais uma vez é no exterior da máscara do operador que se registam os maiores valores para as áreas de superfície por volume pulmonar das nanopartículas. O maior valor foi de 99290 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na figura 4.27 apresenta-se o registo de medições realizadas antes dos ensaios e antes das réplicas de cada um desses ensaios.

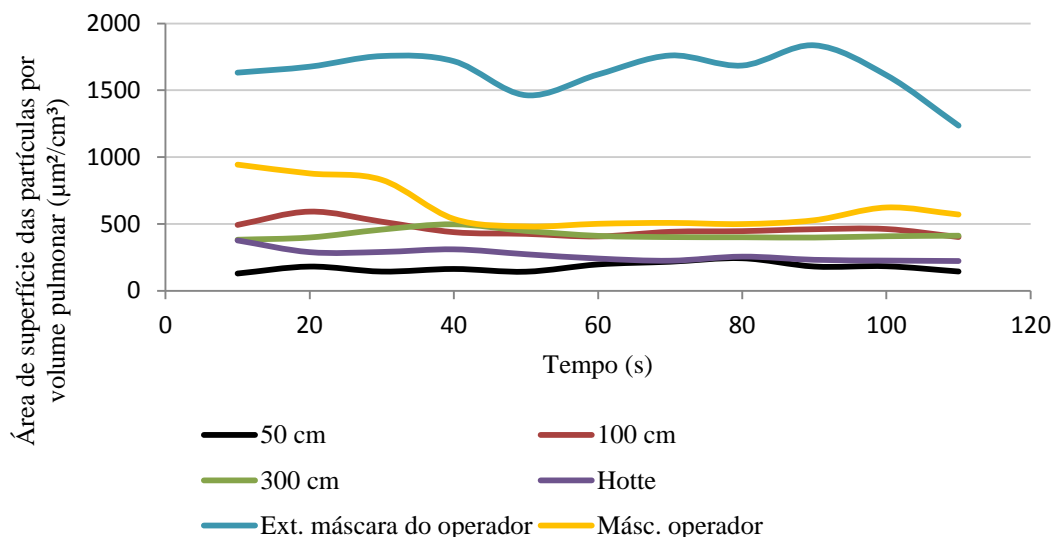


Figura 4.27: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 3.

Na figura 4.27 a linha de medição no ambiente que registou valores mais altos foi a linha correspondente ao ponto de amostragem no exterior da máscara do operador. Para este ponto o

valor máximo da área de superfície por volume pulmonar das partículas é de, aproximadamente, $1800 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na figura 4.28 apresenta-se a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Neste gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

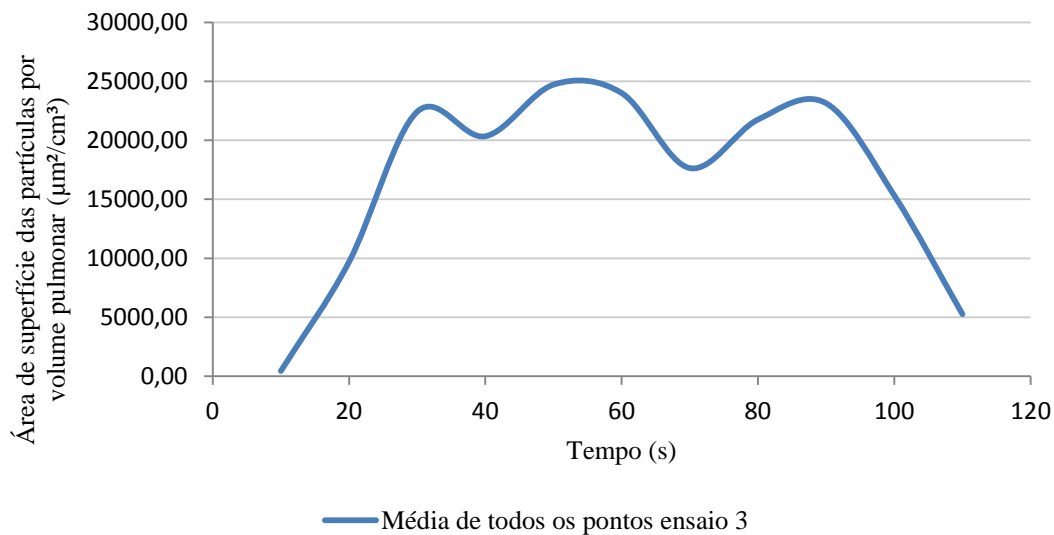


Figura 4.28: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 3

Na figura 4.28 o valor máximo é de $24719 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

1.1.1 Ensaio 4

O ensaio 4, corresponde às amostragens realizadas nos pontos indicados na figura 3.28 para o processo de soldadura por eléctrodos revestidos básicos com uma intensidade de corrente de 90 A. Os ensaios e as réplicas realizadas tiveram uma duração média de 66 s.

Nas figuras 4.29 e 4.30 encontram-se representados os valores referentes à média das medições realizadas nos ensaios e réplicas para os pontos de amostragem.

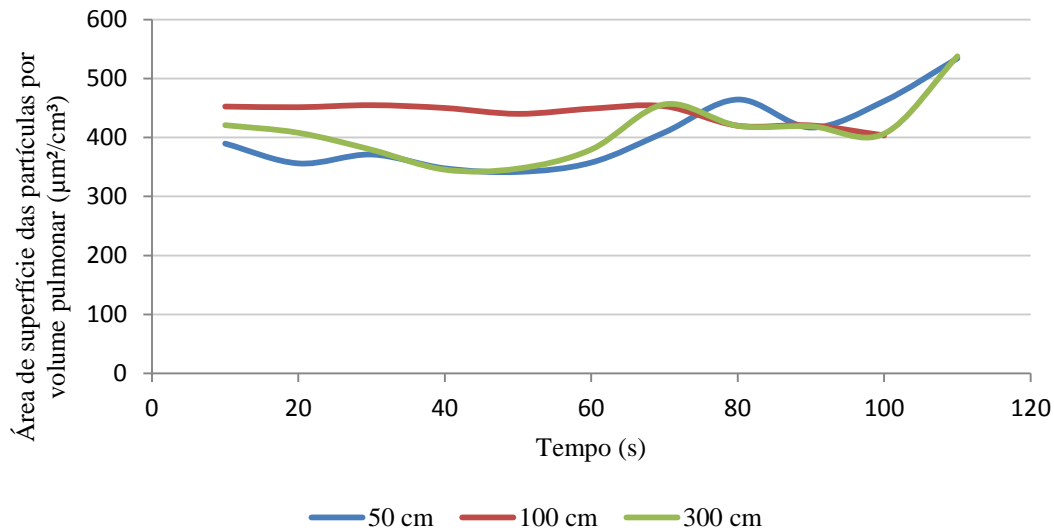


Figura 4.29: Eléctrodo Básico 90 (A) a 50 cm, 100 cm, 300 cm.

Na figura 4.29 apresentam-se os valores para as áreas de superfície por volume pulmonar das partículas com capacidade de deposição alveolar muito semelhantes relativamente às diferentes distâncias de amostragem. O ensaio 4 foi precedido de vários ensaios e as semelhanças nestas amostragens, em pontos diferentes, são resultado de uma elevada concentração de nanopartículas em suspensão e o tempo de deposição foi superior ao que inicialmente era esperado.

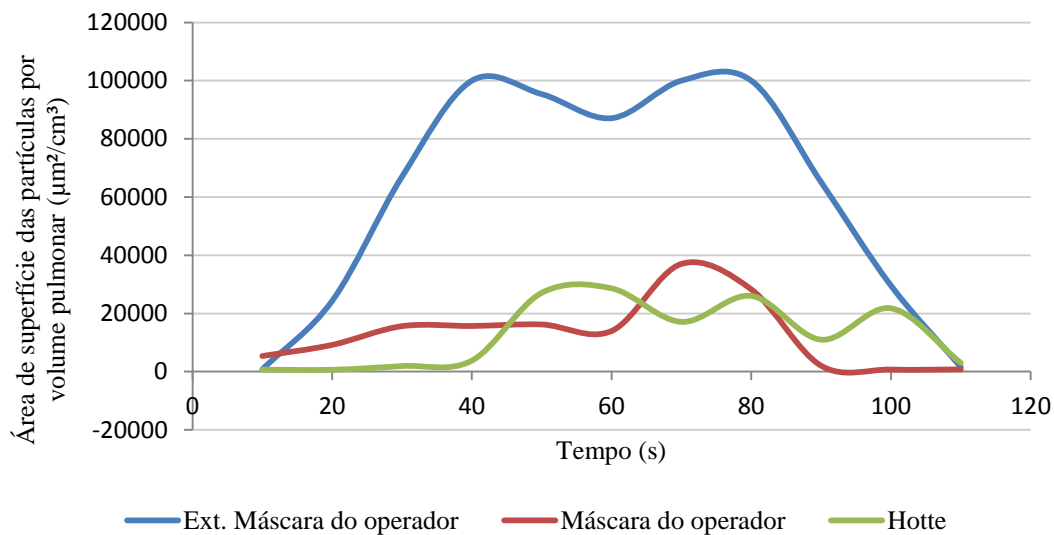


Figura 4.30: Eléctrodo Básico 90 (A) no exterior da máscara do operador, no interior da máscara do operador e na hotte.

Na figura 4.30 apresentam-se as medições para os pontos do exterior da máscara do operador, do interior da máscara do operador e da hotte. É no exterior da máscara do operador

que se registam os maiores valores para as áreas de superfície por volume pulmonar das nanopartículas sendo o maior valor de $100000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na figura 4.31 apresenta-se o registo de medições realizadas antes dos ensaios e antes das réplicas de cada um desses ensaios.

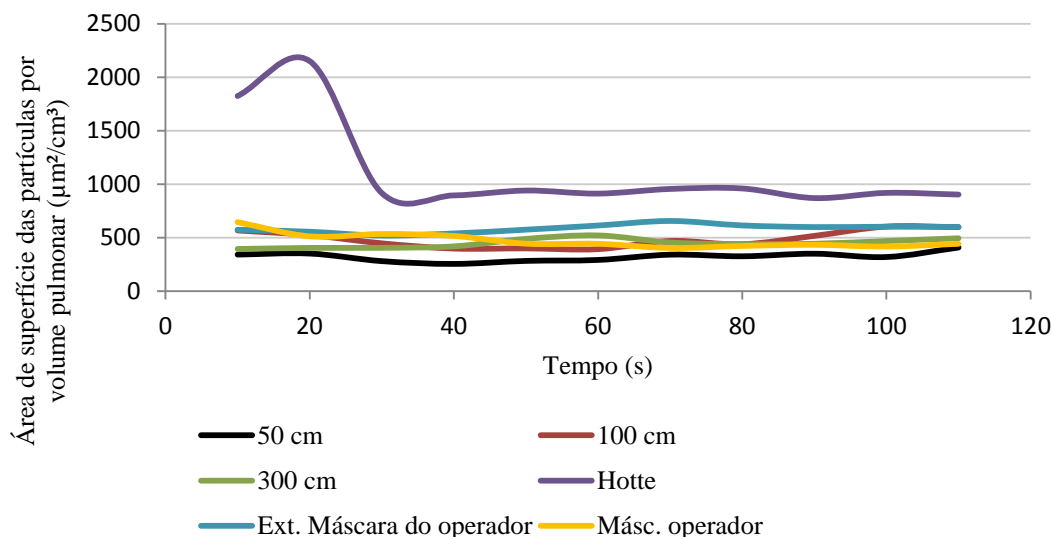


Figura 4.31: Medição com NSAM ao ambiente antes dos ensaios e suas réplicas nos vários pontos do ensaio 4.

Na figura 4.31 as linhas das medições realizadas no ambiente apresentam um máximo no ponto de amostragem da *hotte*, com uma área de superfície por volume pulmonar de, nanopartículas de aproximadamente $2300 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na figura 4.32 apresenta-se a média dos resultados obtidos em todos os pontos de amostragem. Neste gráfico pode-se ter uma ideia geral das áreas das partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

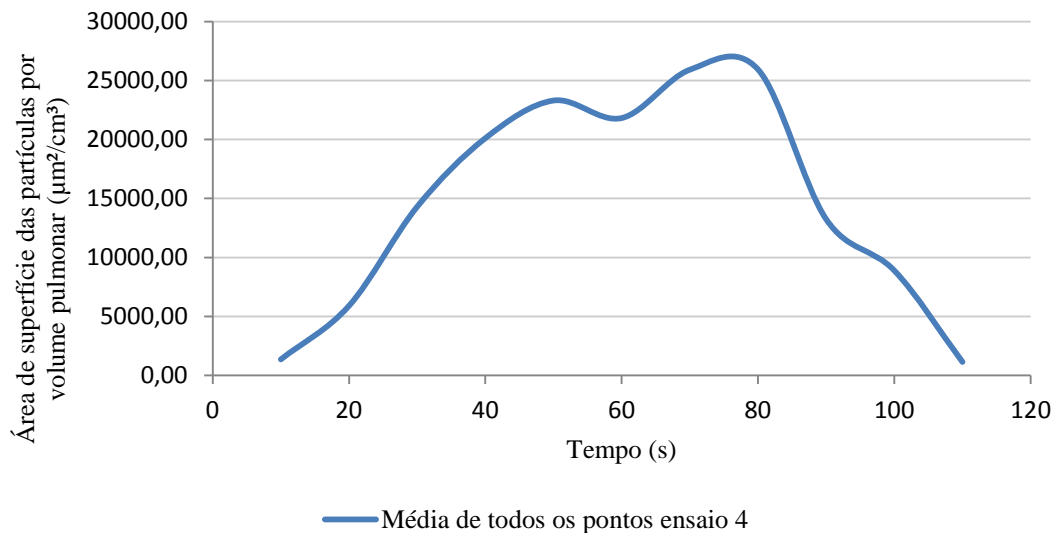


Figura 4.32: Média de todos os pontos de amostragem do Ensaio 4.

Na figura 4.32 o valor máximo é de $25938 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Este valor representa o máximo médio dos cinco pontos de amostragem no laboratório.

1.1.2 Discussão dos resultados do NSAM no processo de soldadura SER.

Como o processo de soldadura SER é um processo manual os tempos de soldadura têm sempre algumas diferenças entre cada ensaio. O tempo de soldadura médio de todos os ensaios foi de aproximadamente 65 s, com um desvio padrão de 7,7 s.

Nos gráficos, os primeiros picos representam, o ponto em que as partículas resultantes do processo de soldadura são recolhidas pelo equipamento. Dependendo do tempo de soldadura é possível também observar uma diminuição das áreas de superfície das partículas por volume de pulmão assim que o processo de soldadura termina.

Os gráficos correspondentes às medições realizadas antes dos ensaios e réplicas mostram o tempo que as partículas demoram a depositar e em, alguns ensaios, o tempo de medição não é o suficiente para que as partículas depositem por completo. Esta situação é provocada não só pelos ensaios do ensaio a ser analisado nesse momento mas também pelos outros ensaios que tenham sido realizados para os ensaios precedentes.

Em alguns gráficos é possível observar picos nas medições seguidos de decréscimos rápidos. Estes valores são resultado da saturação do equipamento e, muitas vezes, o valor apresentado no pico não é o maior valor provocado por aquele ensaio. Na realidade, os valores provocados pelo processo foram superiores, mas como as leituras no NSAM são realizadas de 10 em 10 segundos, quando o equipamento satura passa a registrar valores de área de superfície por

volume pulmonar mais baixos, muito rapidamente, e apresenta a nova medição com um valor inferior ao que seria de esperar.

Comparando os vários ensaios, é possível reconhecer qual o eléctrodo e intensidade de corrente responsável por provocar maiores áreas de superfície por volume pulmonar de partículas com capacidade de deposição pulmonar. Comparando os ensaios 1 e 2, onde o tipo de eléctrodo é um eléctrodo revestido rutílico e a intensidade de corrente é de 70 A e 90 A, respectivamente, é possível verificar que o processo de soldadura com a intensidade de corrente de 90 A provoca as maiores áreas superficiais. Este facto encontra-se bem ilustrado nas figuras 4.20 e 4.24, onde os valores médios de todos os pontos de amostragem dos dois ensaios são superiores no ensaio 2. Comparando da mesma forma os ensaios 3 e 4, onde o tipo de eléctrodo é um eléctrodo revestido básico e a intensidade de corrente é de 70 A e 90 A, respectivamente, a análise é análoga: o ensaio 4 vai apresentar os maiores valores de área de superfície por volume pulmonar para partículas com capacidade de deposição alveolar. Nas figuras 4.28 e 4.32 verifica-se que é nos resultados do ensaio 4 que se obtêm os maiores valores.

Para se determinar qual dos eléctrodos provoca maiores valores nas medições do NSAM, é apenas necessário comparar o ensaio 2 com o ensaio 4 e analisar as figuras 4.24 e 4.32 onde se pode observar que o ensaio 4 é onde foram medidas as maiores áreas de superfície por volume pulmonar de nanopartículas.

4.6 Resultados de granulometria do SMPS no processo de soldadura MAG

No capítulo 3.6.4 explicou-se como foi realizado o procedimento experimental, de onde resultaram quatro gráficos, um por cada ensaio indicado na tabela 3.7, que refere as concentrações das nanopartículas em número de partículas por volume de ar, e a sua distribuição por tamanho (diâmetro).

4.6.1 Ensaio 1

A figura 4.33 corresponde a uma amostragem no ambiente antes do processo de soldadura e uma amostragem a um cordão de soldadura do processo de soldadura MAG durante 3 minutos.

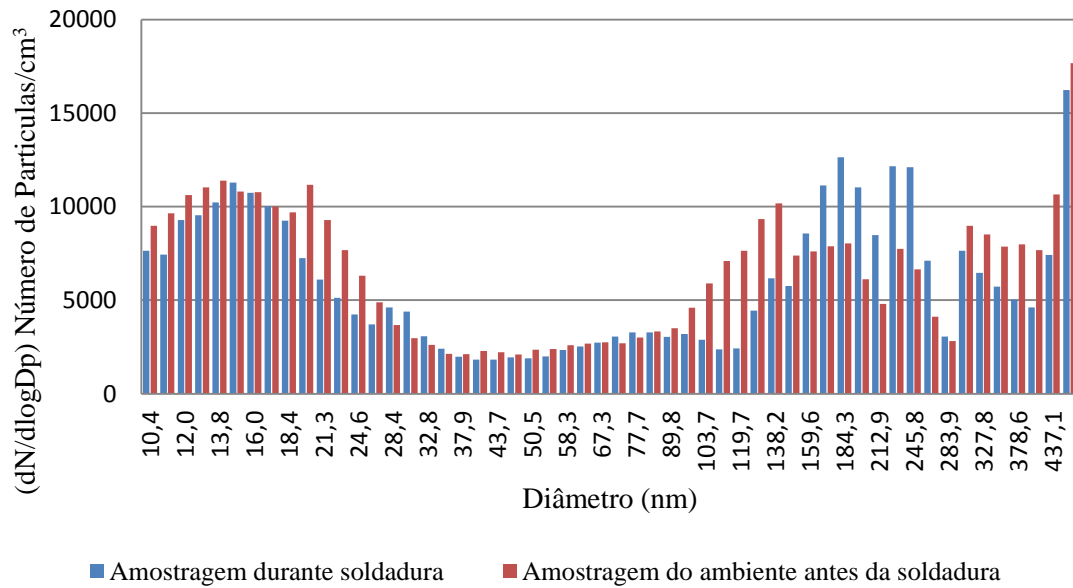


Figura 4.33: Resultados SMPS Ensaio 1.

Na figura 4.33, para as primeiras dimensões de diâmetro, entre 10,4 nm e 18,4 nm, o número de partículas por cm^3 é aproximadamente o mesmo para cada amostragem realizada antes da soldadura e durante a soldadura. As duas últimas barras correspondentes à amostragem durante a soldadura e à amostragem do ambiente antes da soldadura não devem ser consideradas porque resultam de um erro do equipamento. A dimensão que existe em maior quantidade é de 184,3 nm e existem 12631 partículas por cm^3 com esta dimensão. O diâmetro médio das partículas resultantes deste processo de soldadura foi de 144,5 nm.

4.6.2 Ensaio 2

Na figura 4.34 representa-se o resultado de uma amostragem no ambiente antes do processo de soldadura e uma amostragem a um cordão de soldadura do processo de soldadura MAG durante 3 minutos.

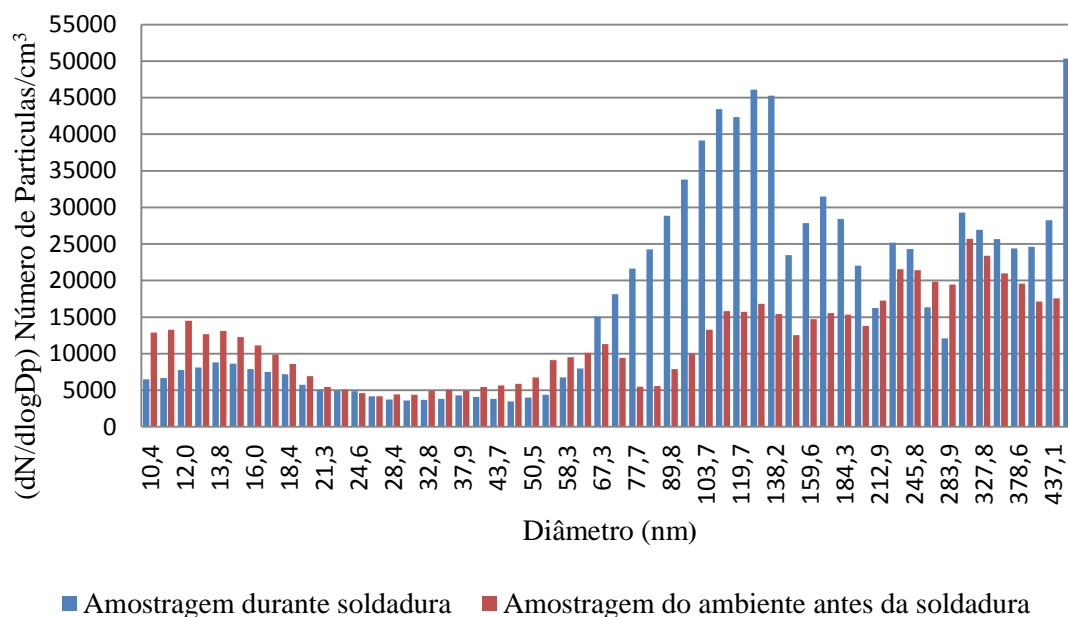


Figura 4.34: Resultados SMPS Ensaio2.

Na figura 4.34 a concentração das partículas é maior entre as gamas de diâmetro de 67,3 nm e de 138,2 nm. A última barra correspondente à amostragem durante a soldadura deve ser rejeitada por ser um erro do equipamento. A dimensão que existe em maior quantidade é de 128,6 nm e existem 46110 partículas por cm³ com essa dimensão. Para o ensaio 2 o diâmetro médio das partículas é de 180,3 nm.

4.6.3 Ensaio 3

Na figura 4.35 representa-se o resultado de uma amostragem no ambiente antes do processo de soldadura e uma amostragem a um cordão de soldadura do processo de soldadura MAG durante 3 minutos.

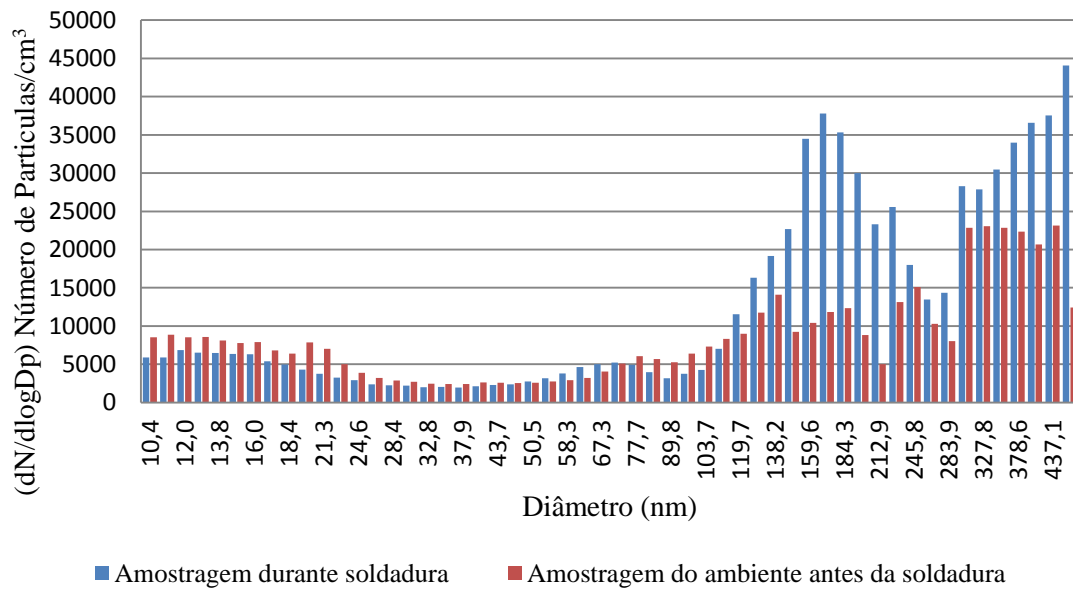


Figura 4.35: Resultados SMPS Ensaio 3

Na figura 4.35 a maior quantidade de partículas ocorre nas últimas gamas de diâmetro, entre os 128,6 nm e os 437,1 nm, e existe também uma grande diferença entre as medições realizadas durante a soldadura e antes da soldadura no ambiente. A dimensão que existe em maior quantidade é de 171,5 nm e existem 37785 partículas por cm³. O diâmetro médio das partículas resultantes do processo de soldadura foi de 229,1 nm.

4.6.4 Ensaio 4

Na figura 4.36 representa-se o resultado de uma amostragem no ambiente antes do processo de soldadura e uma amostragem a um cordão de soldadura do processo de soldadura MAG durante 3 minutos.

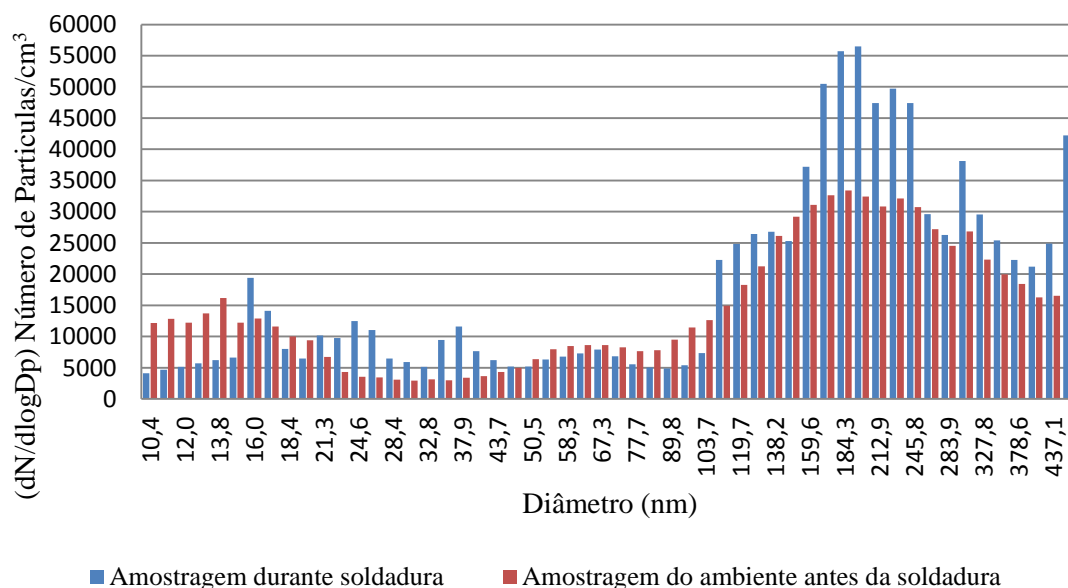


Figura 4.36: Resultados SMPS Ensaio 4.

Na figura 4.36 é possível observar as zonas onde as medições durante o processo de soldadura apresentaram maiores quantidades de partículas por volume de ar. A gama de diâmetros onde os resultados das medições durante o processo de soldadura atingem as maiores concentrações é entre os diâmetros de 159,6 nm e de 305,1 nm e com um número de partículas por volume de ar entre 37228 partículas/cm³ e 56503 partículas/cm³. No ensaio 4 o diâmetro médio das partículas da amostragem durante a soldadura é de 192,1 nm.

4.6.5 Discussão dos resultados de SMPS

Analisando em detalhe todos os gráficos podem identificar-se quais as características do processo de soldadura responsáveis pelas maiores concentrações de partículas e pelos diâmetros médios com maior eficiência de deposição alveolar. A eficiência de deposição encontra-se representada na figura 2.10, onde se pode verificar que as partículas, entre aproximadamente os 10 nm e os 100 nm, são as que têm maior eficiência de deposição alveolar. Nos ensaios aqui analisados os diâmetros médios são todos superiores a 100 nm. No entanto, vão ser os diâmetros que mais se aproximem dos 100 nm que vão ter uma maior eficiência de deposição alveolar.

O ensaio com a maior concentração de partículas por cm³ de ar foi o ensaio 4, que teve uma concentração total de 30628 partículas/cm³.

O ensaio que originou partículas com o menor diâmetro, ou seja, com maior eficiência de deposição alveolar, foi o ensaio 1 com diâmetros médios de 144,5 nm.

Fazendo uma comparação entre os ensaios 1 e 2, onde apenas a mistura gasosa difere, pode-se observar que o ensaio 1, em relação ao ensaio 2, tem em média, áreas com maior eficiência

de deposição alveolar. No entanto, é o ensaio 2 que provoca maiores concentrações de partículas por volume de ar. Comparando da mesma forma os ensaios 3 e 4, onde apenas difere a mistura gasosa, observa-se que o ensaio 4 em relação ao ensaio 3 é o que apresenta maiores concentrações de partículas por volume de ar. No entanto, as partículas resultantes do ensaio 3 têm em média, diâmetros menores, ou seja, com maior eficiência de deposição alveolar.

4.7 Resultados da análise por microscopia

Com o equipamento de recolha de amostras NAS, obtiveram-se amostras das partículas libertadas pelos processos de soldadura, o que tornou possível a sua análise química e morfológica.

4.7.1 Resultados da análise química do processo de soldadura MAG

Na figura 4.37 pode observar-se o resultado de uma microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X às partículas resultantes do processo de soldadura MAG com a mistura gasosa Ar+18 % CO₂.

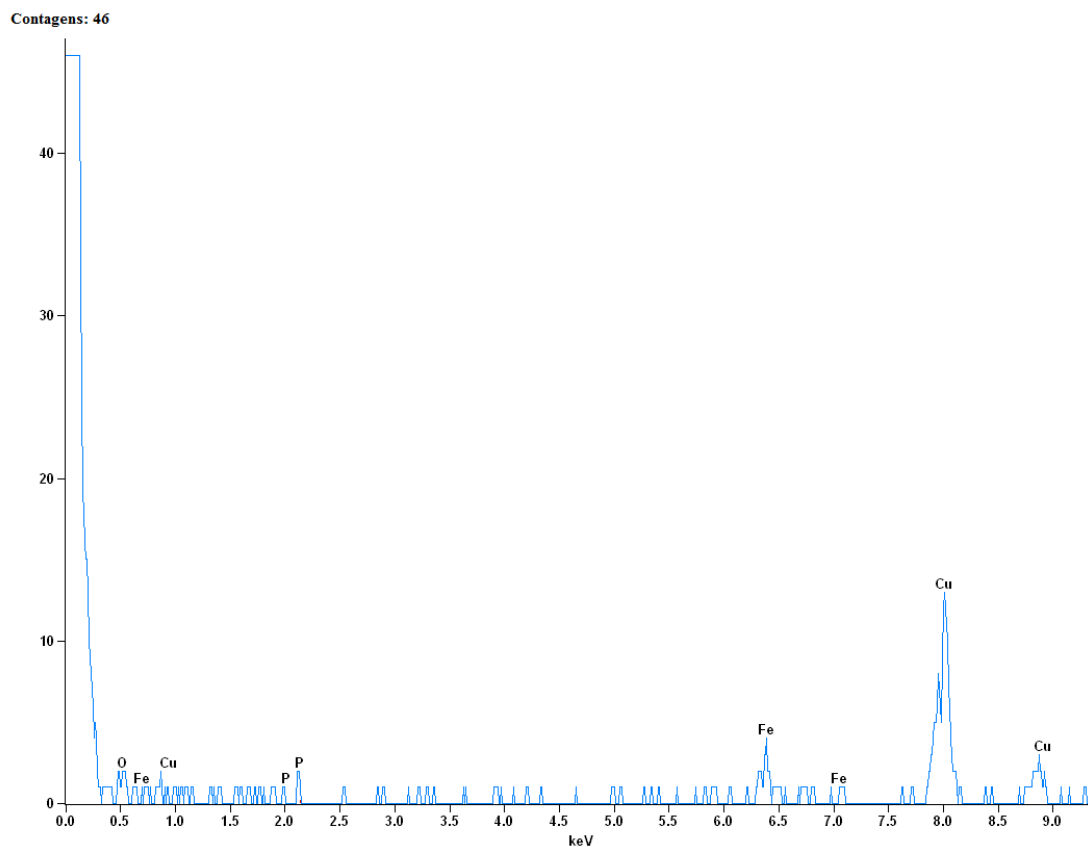


Figura 4.37: Análise EDS da mistura gasosa Ar+18 % CO₂

Na figura 4.37 podem distinguir-se os vários elementos recolhidos pela grelha. Os elementos que foram libertados pelo processo foram o fósforo e o ferro. O cobre que também se identifica em grande quantidade é apenas resultado do material da grelha onde as partículas se encontram que é de cobre.

Na figura 4.38 apresenta-se o espectro das amostras recolhidas durante o processo de soldadura MAG com a mistura gasosa Ar+8 % CO₂.

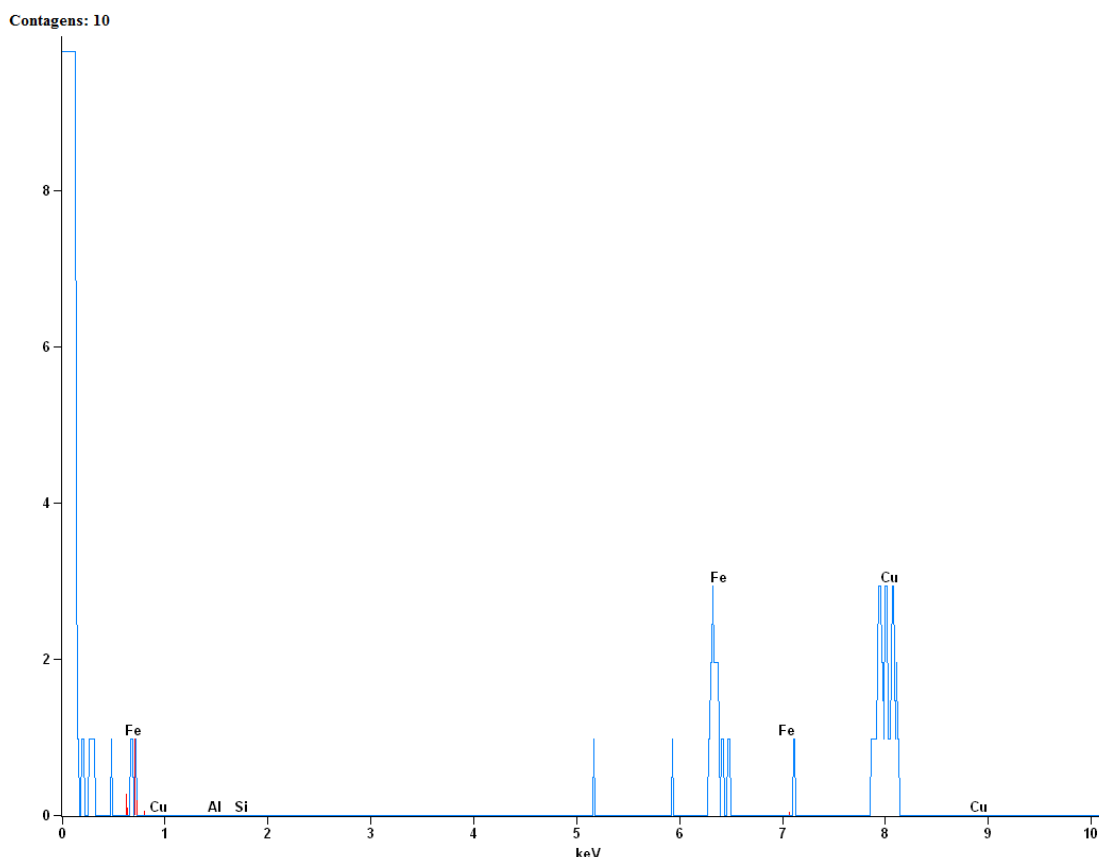


Figura 4.38: Análise EDS da mistura gasosa Ar+8 % CO₂

Para o processo de soldadura MAG com a mistura gasosa Ar+8 % CO₂ o único elemento observado foi o ferro.

Tanto no processo de soldadura MAG, com a mistura gasosa mais oxidante, como na menos oxidante, os elementos químicos recolhidos foram elementos resultantes da composição do fio de soldadura.

4.7.2 Resultados da análise morfológica do processo de soldadura MAG

Uma das características importantes detectadas nas partículas recolhidas é a sua forma. Na figura 4.39 pode ver-se imagens captadas por microscopia TEM para o processo de soldadura MAG com a mistura gasosa de Ar+18 % CO₂.

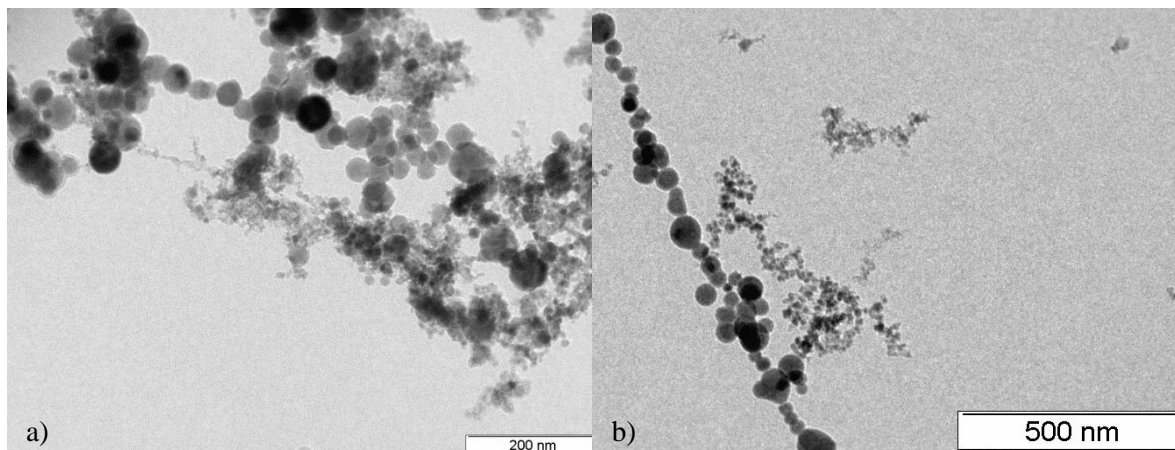


Figura 4.39: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG com mistura gasosa Ar+18 % CO₂,

a) Partículas à escala de 200 nm. B) Partículas à escala de 500 nm.

Nas imagens na figura 4.39 verifica-se que as partículas se encontram aglomeradas e sem fronteiras bem delimitadas, ou seja são partículas amorfas. Tanto na figura 4.39 a) como na b) é possível ver que as partículas chegam a atingir dimensões mínimas inferiores a 10 nm e não maiores do que 100 nm. Estas partículas são partículas que, de acordo com o gráfico da figura 2.10 têm a maior eficiência de deposição alveolar.

A figura 4.40 apresenta duas imagens captadas por de microscopia TEM para o processo de soldadura MAG com a mistura gasosa Ar+8 % CO₂.

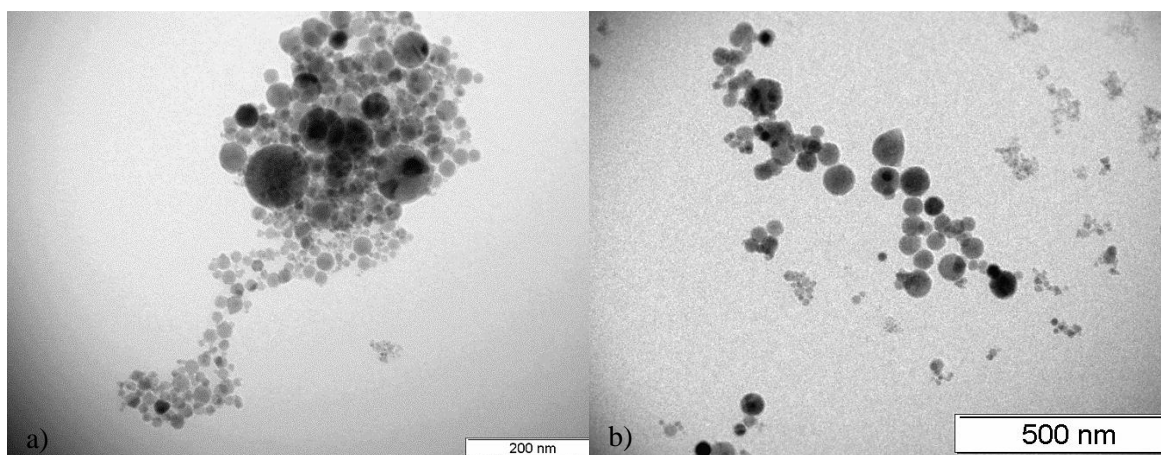


Figura 4.40: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG com mistura gasosa Ar+8 % CO₂,

a) Partículas à escala de 200 nm. b) Partículas à escala de 500 nm.

As partículas representadas na figura 4.40 são, à semelhanças das partículas do processo com a mistura mais oxidante, partículas amorfas e com dimensões também inferiores a 10 nm e não superiores do que os 100 nm. Estas partículas são partículas de alta eficiência de deposição alveolar como se pode ver pelo gráfico da figura 2.20. As nanopartículas resultantes da mistura gasosa de Ar+8 % CO₂ diferem das partículas resultantes da mistura de Ar+18 % CO₂ por não se

encontrarem aglomeradas da mesma forma. Estas partículas encontram-se mais dispersas, como se pode ver na imagem b) da figura 4.40.

4.7.3 Resultados da análise química do processo de soldadura SER

Na figura 4.41 apresenta-se o espectro resultante de uma microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X às partículas resultantes do processo de soldadura SER com eléctrodos revestidos básicos.

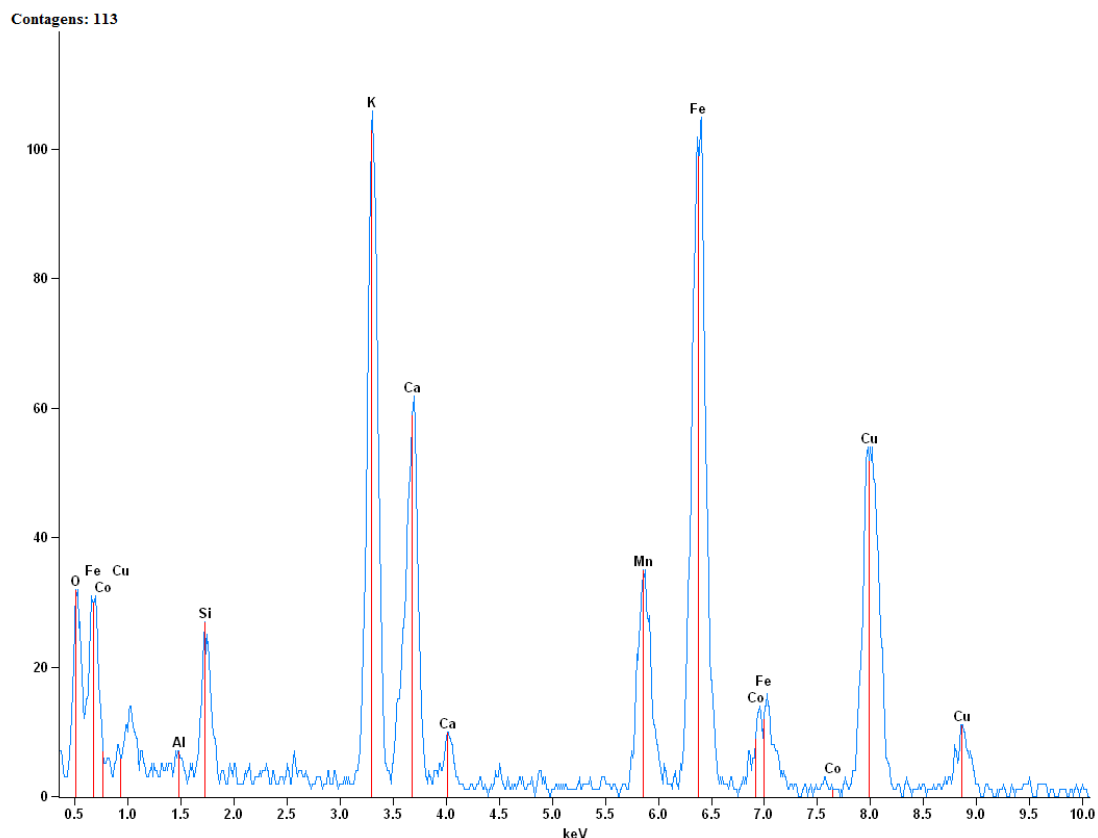


Figura 4.41: Análise EDS, Eléctrodos básicos

Na figura 4.41 apresentam-se os resultados da microanálise que revelam grandes quantidades de potássio, ferro, cálcio, manganês e cobalto. Estes elementos resultam do revestimento do eléctrodo. O cobre é considerado como sendo da grelha onde se analisaram as amostras e não resultado do processo de soldadura.

Na figura 4.42 apresenta-se o espectro relativo à análise química realizada ao processo de soldadura SER com eléctrodos revestidos rutilícos.

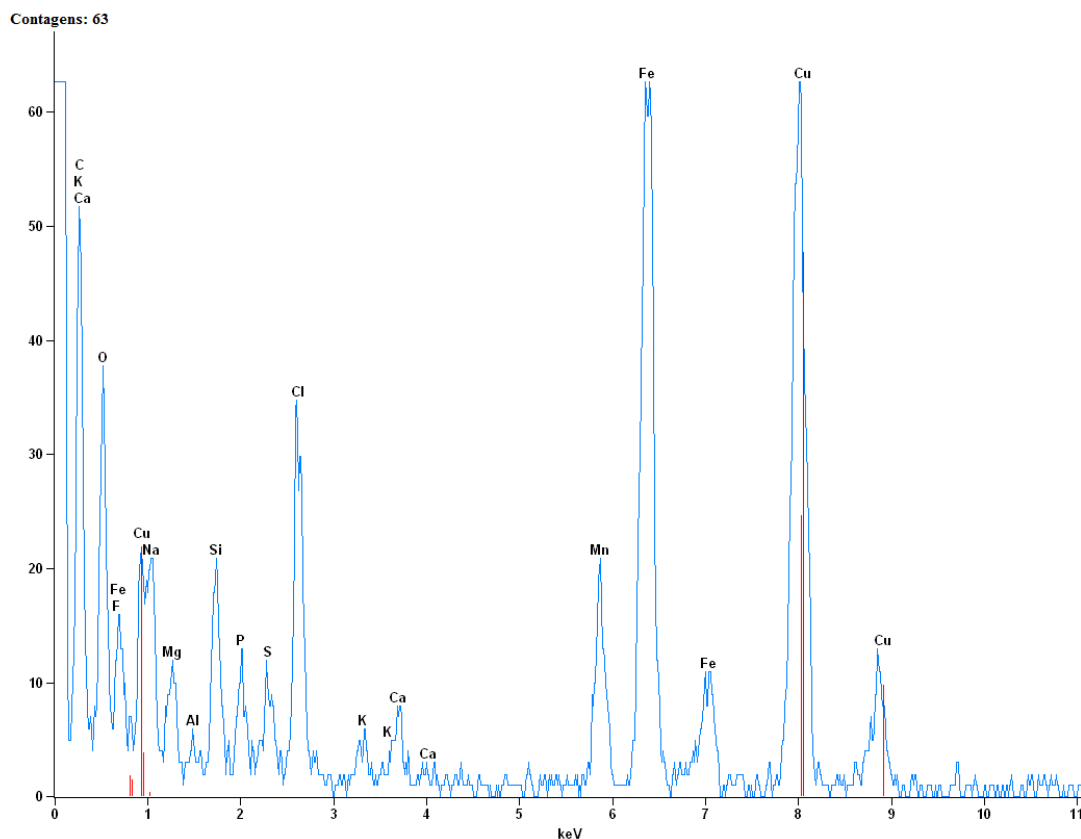


Figura 4.42: Análise EDS, Eléctrodos Rutilícos

Na figura 4.42 é possível distinguir vários elementos, dos quais se destacam o potássio, o cálcio, o cloro, o silício, o ferro e o manganês. Estes elementos são o resultado da fusão do revestimento e da escória formada por este mesmo revestimento durante o processo de soldadura.

4.7.4 Resultados da análise morfológica do processo de soldadura SER

Na figura 4.43 apresentam-se duas imagens resultantes da análise por microscopia TEM a uma grelha com partículas captadas no processo de soldadura SER com eléctrodos revestidos rutilícos.

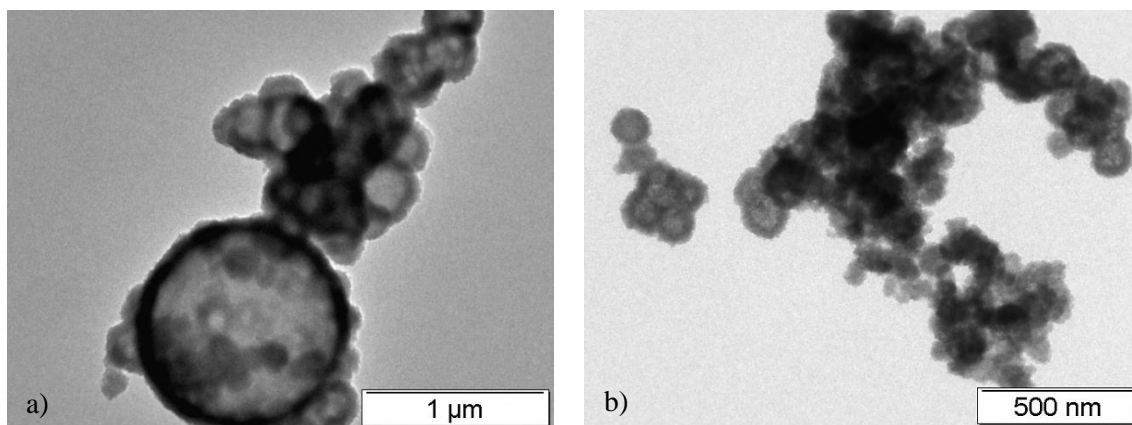


Figura 4.43: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura SER com eléctrodos Rutilícos,

a) Partículas à escala de 1 μm . b) Partículas à escala de 500 nm.

As partículas do processo de soldadura por eléctrodos revestidos rutilícos, caracterizam-se por serem bastante aglomeradas com formas esféricas, como pode observar-se na imagem a), e bastante amorfas. As partículas na figura a) encontram-se mais aglomeradas e maiores do que da figura b). As partículas apresentam dimensões que vão desde ligeiramente inferiores a 100 nm até aproximadamente 500 nm.

A figura 4.44 é composta por duas imagens obtidas por microscopia TEM no processo de soldadura por eléctrodos revestidos básicos.

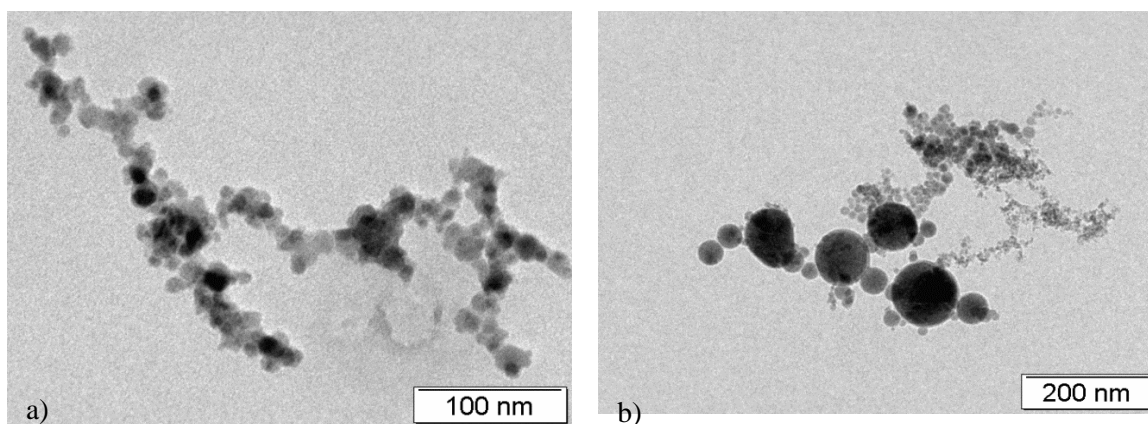


Figura 4.44: Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura SER com eléctrodos Básicos,

a) Partículas à escala de 100 nm. b) Partículas à escala de 200 nm.

As imagens a) e b) da figura 4.44 são, à semelhança das partículas dos eléctrodos rutilícos, amorfas e com formas esféricas. No entanto, estas partículas apresentam dimensões muito menores que vão desde dimensões inferiores a 10 nm até aproximadamente os 100 nm. Estas partículas encontram-se mais dispersas e são também o resultado da fusão do material de revestimento dos eléctrodos.

5. CONCLUSÕES

Do trabalho efectuado é possível concluir que:

- Existem grandes concentrações de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar, libertadas em processos de soldadura por fusão, especificamente processos de soldadura por eléctrodos revestidos e o processo MAG.
- Para o processo de soldadura MAG, tendo em conta as misturas gasosas utilizadas, e os modos de transferência testados, foi possível identificar que a mistura gasosa de Ar+18 % CO₂ no modo de transferência por *spray*, originaram partículas com as maiores áreas de superfície com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar. Apesar de ainda não existirem estudos com esta análise, estes resultados não eram exactamente inesperados visto que tanto esta mistura gasosa, como este modo de transferência, já tivessem sido reconhecidos como aqueles que conduzem a elevadas taxas de formação de fumos[7].
- As concentrações das nanopartículas resultantes do processo de soldadura MAG atingiram valores bastante elevados, na ordem das 55000 partículas/cm³. O ensaio com a mistura gasosa de Ar+8 % CO₂ no modo de transferência por *spray* apresentou uma concentração total de partículas por volume de ar mais elevada. No entanto, esta condição não é considerada como a mais prejudicial dado que apresenta uma baixa eficiência de deposição alveolar.

- A mistura gasosa de Ar+18 % CO₂ em modo de transferência globular, apresentou a maior eficiência de deposição alveolar das partículas libertadas. As partículas libertadas eram compostas principalmente por ferro. A análise morfológica validou as medições de granulometria uma vez que as partículas recolhidas apresentam dimensões nanométricas, e algumas com dimensões inferiores a 10 nm. Para o processo de soldadura MAG não foi possível obter uma relação entre a entrega térmica e a emissão de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar por limitações laboratoriais.
- No processo de soldadura por eléctrodos revestidos, foi possível determinar a intensidade de corrente e o tipo de eléctrodo que originam maiores áreas de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar. Os eléctrodos revestidos básicos com uma intensidade de corrente de 90 A conduziram às maiores áreas já referidas. Em relação à análise qualitativa efectuada em TEM da concentração de elementos libertados, tanto nos eléctrodos revestidos básicos como nos eléctrodos revestidos rutilícos, identificaram-se picos de elevada intensidade, sendo que, para os eléctrodos rutilícos observou-se maior diversidade de elementos químicos. A análise morfológica revelou a presença de partículas de dimensões inferiores aos 100 nm, ou seja, com grande eficiência de deposição alveolar. A combinação destes dois factos representa um risco para a saúde dos operadores. Também neste processo de soldadura a entrega térmica média parece não ter uma relação directa com a libertação de nanopartículas.
- Em relação aos dois processos de soldadura em estudo, ficou comprovado, que o processo de soldadura MAG é aquele que liberta maiores quantidades de partículas nanométricas. Tanto o processo de soldadura SER, como o processo de soldadura MAG, libertam partículas com elevada capacidade de deposição alveolar.
- A mesa de soldadura construída para a realização dos ensaios, cumpriu os objectivos estabelecidos. A utilização de novos controladores para o motor, permitiria melhorar o controlo da velocidade e da estabilidade da mesa.

Em futuros trabalhos sobre este tema, seria interessante fazer um estudo mais detalhado sobre, os efeitos dos parâmetros de soldadura na concentração das partículas em vários pontos de recolha. O estabelecimento de uma relação entre a entrega térmica de soldadura e a concentração de nanopartículas é também muito pertinente, para avaliar a influência da temperatura na libertação destas partículas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Pires, L. Quintino, R. Miranda, and J. Gomes, "Fume emissions during gas metal arc welding," *Toxicological & Environmental Chemistry*, vol. 88(3), pp. 385–394, 2006.
- [2] Disponível em: <http://www.ewf.be/econweld.aspx> acessado a 3 de Fevereiro de 2012.
- [3] M. H. Lee, W. J. McClellan, J. Candela, D. Andrews, and P. Biswas, "Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, pp. 127-136, Jan 2007.
- [4] D. Brouwer, "Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces," *Toxicology*, vol. 269, pp. 120-127, Mar 2010.
- [5] A. T. Zimmer, P. A. Baron, and P. Biswas, "The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process," *Journal of Aerosol Science*, vol. 33, pp. 519-531, Mar 2002.
- [6] H. Fissan, S. Neumann, A. Trampe, D. Y. H. Pui, and W. G. Shin, "Rationale and principle of an instrument measuring lung deposited nanoparticle surface area," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, pp. 53-59, Jan 2007.
- [7] I. Pires, L. Quintino, and R. M. Miranda, "Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate," *Materials & Design*, vol. 28, pp. 1623-1631, 2007.
- [8] J. M. Antonini, M. D. Taylor, A. T. Zimmer, and J. R. Roberts, "Pulmonary responses to welding fumes: Role of metal constituents," *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues*, vol. 67, pp. 233-249, Feb 2004.
- [9] J. F. Gomes, P. C. Albuquerque, R. M. Miranda, and M. T. Vieira, "Determination of airborne nanoparticles from welding processes," presented at the International Conference on Occupational Environmental Health, 2011.
- [10] K. Elihn, P. Berg, and G. Liden, "Correlation between airborne particle concentrations in seven industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition," *Journal of Aerosol Science*, vol. 42, pp. 127-141, Feb 2011.
- [11] J. F. O. Santos and L. Quintino, *Processos de Soldadura*: ISQ, 1999.
- [12] A. D. Althouse, C. H. Turnquist, W. A. Bowditch, K. E. Bowditch, and M. A. Bowditch, *Modern Welding*. Illinois: The Goodheart-Willcox Company, Inc., 2004.
- [13] Disponível em <http://science.howstuffworks.com/welding2.htm>, Acessado a 11 de Julho de 2012.

- [14] "Soldadura por arco manual o eléctrico. Fundamento". Disponível em <http://www.emagister.com/curso-soldadura-arco-manual-electrico-fundamentos/electrodos-tipos-condiciones-uso-desnudo-revestimiento-revestido>, acessado a 25 de Julho de 2012.
- [15] "Shielded Metal Arc Welding (SMAW)", Disponível em: http://ent.mrt.ac.lk/~040234/index_files/Page358.htm, Acessado em 25 de Julho de 2012.
- [16] "MIGMAG lassen (GMAW)", Disponível em: <http://www.multiweld.com/mig-mag-lassen.aspx>, Acessado em 10 de Fevereiro de 2012.
- [17] F. W. Olin, "Weld Training Packet", 2006.
- [18] Miller, "Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)", Disponível em http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf, Acessado a 08 de Junho de 2012.
- [19] J. Modenesi , Prof. Paulo, "Introdução à Física do Arco Eléctrico e sua Aplicação na soldagem dos metais," ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [20] S. Escala, M. Nooij, and L. Quintino, "Economically Welding in a Healthy Way," presented at the 1st IIW South - East European Welding Congress, 2006.
- [21] N. Group. (2009). Good Safety and Health in Workshops is Good Business. Disponível em: http://www.acs-cal.com/PDF/Welding_health%20pdf.ashx_1.pdf, Acessado a 12 de Fevereiro de 2012.
- [22] Chemical Analysis, Disponível em: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/index.htm>, Acessado em 12 de Fevereiro de 2012.
- [23] L. Quintino, B. Hourmat, and I. Pires, "Health and Safety in Welding in the European Union," presented at the XXXV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Piracicaba, SP, Brasil, 2009.
- [24] L. Matos, P. Santos, and F. Barbosa, "As Nanopartículas em Ambientes Ocupacionais," *Revista Segurança*, vol. 202, pp. 10-14, 2011.
- [25] Igus, "GuiaLinearDryLinZLW", Disponível em: <http://www.igus.pt/wpck/default.aspx?PageNr=2370>, Acessado em 15 de Julho de 2012.
- [26] Astrosyn, "TECHNICAL DATASHEET Model ML23HS1-5 Hybrid Stepper Motor", 2012.
- [27] Astrosyn, "User Manual P402A", 2012.
- [28] National Instruments, "NI CompactDAQ 8-Slot USB Chassis", Disponível em : <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/207534>, Acessado em 30 de Julho de 2012.

-
- [29] National Instruments, "NI 9401", Disponível em : <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208809>, Acedido em 30 de Julho de 2012.
- [30] National Instruments, "NI 9474", Disponível em: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208823>, Acedido a 30 de Julho de 2012.
- [31] Kemppi, "Welding Torch", Disponível em: <http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/0/16FFB1A982C35E5DC2257181003BD284?opendocument>, Acedido em 31 de Julho de 2012.
- [32] E. A. C. Souza, "CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM," ed: Lincoln Electric Brasil, Disponível em: <http://www.lincolnbrasil.com.br/index.php?action=openFile&path=/media/noticias/files/1092201484847f124538b9.pdf>, Acedido a 30 de Agosto de 2012.
- [33] L. Electric, "STICK (SMAW) ELECTRODE AWS E6013", Disponível em: http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_StickElectrodes-MildandLowAlloySteels-Fleetweld-Fleetweld37/c21019.pdf, Acedido a 11 de Setembro de 2012.
- [34] L. Electric, "STICK (SMAW) ELECTRODE AWS E7018", Disponível em: http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_StickElectrodes-MildandLowAlloySteels-Excalibur-Excalibur7018-1MR/c21011.pdf, Acedido a 11 de Setembro de 2012.
- [35] T.S.I, "Nanoparticle Surface Area Monitor 3550", Disponível em: <http://www.tsi.com/ProductView.aspx?id=21931>, Acedido em 6 de Agosto de 2012.
- [36] T.S.I., "Nanometer Aerosol Sampler Model 3089", Disponível em: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3089.pdf, Acedido em 6 de Agosto de 2012.
- [37] T.S.I., "Model 3034, SMPSTM Scanning Mobility Particle Sizer.Operation and Service Manual", ed. U.S.A: TSI Incorporated, 2003.
- [38] T.S.I, "Aerosol Statistics, Lognormal Distributions and dN/dlogDp ", ed. U.S.A: TSI Incorporated, 2010.
- [39] T.S.I., "Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer 3034". Disponível em: <http://www.tsi.com/scanning-mobility-particle-sizer-spectrometer-3034/>, Acedido em 7 de Agosto de 2012.
- [40] Rede Nacional de Microscopia. Disponível em: http://rnme.up.pt/index_3_pt.htm acedido em 10 de Agosto de 2012.
- [41] E. A. C. Souza, "CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM," ed: Lincoln Electric Brasil.
- [42] S. Kou, Welding Metallurgy. NJ: Wiley Interscience, 2003.
-

ANEXOS

A1. Desenhos técnicos da mesa de soldar

A1.1 Estrutura da mesa de soldar

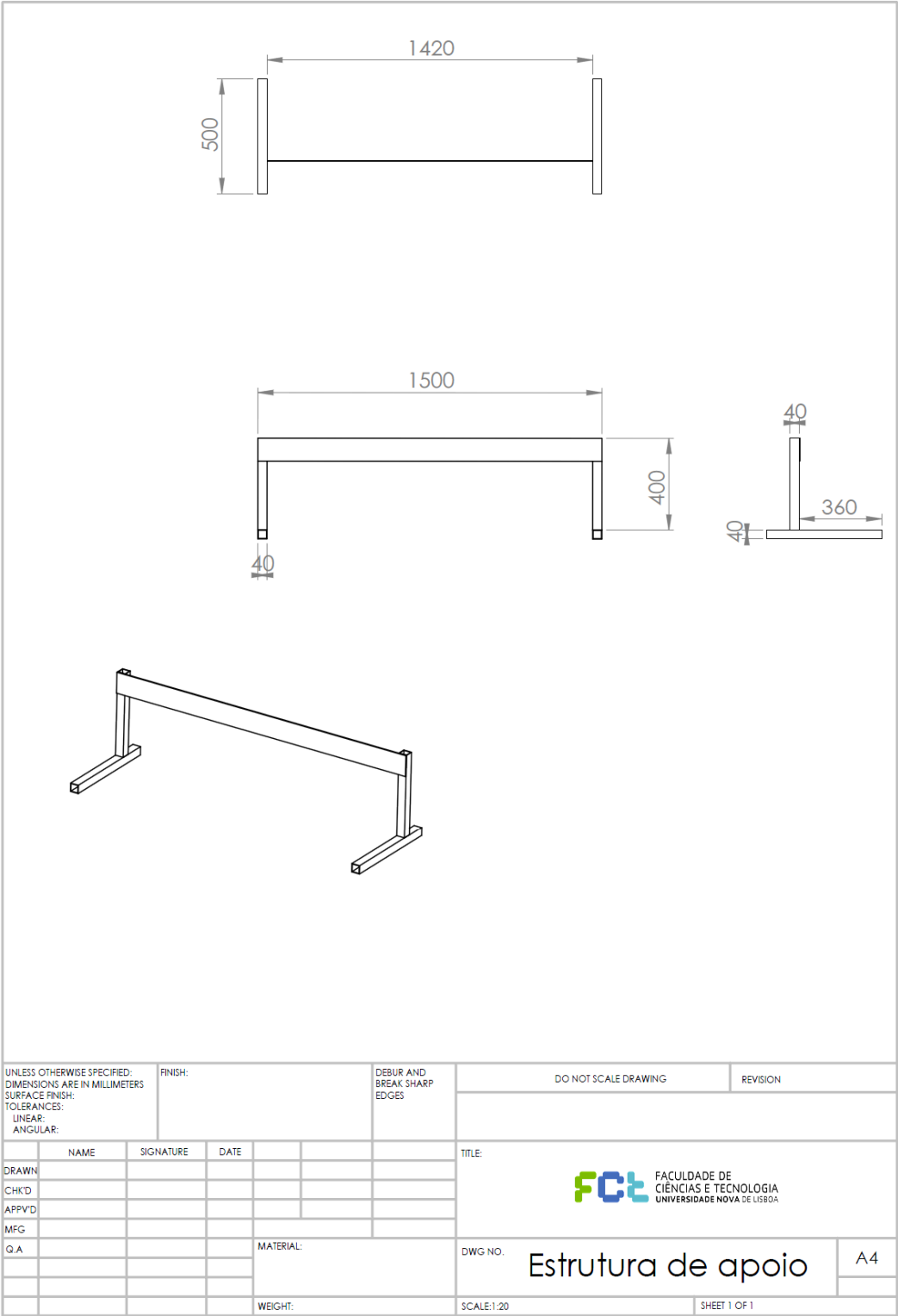


Figura A1: Desenho técnico da estrutura da mesa de soldar

A1.2 Suporte do motor

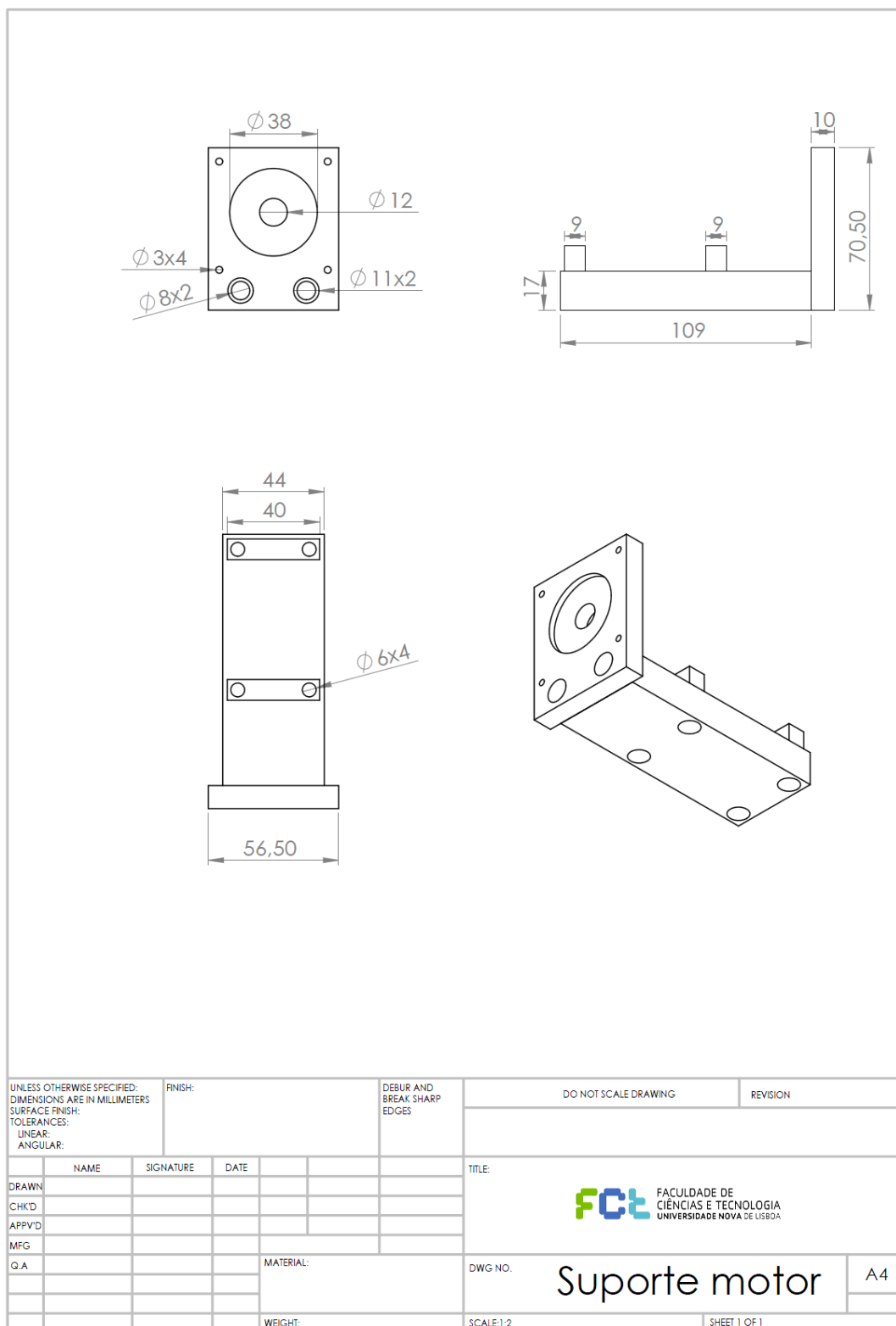


Figura A2: Desenho técnico do suporte do motor

A1.4 Chapa de apoio da tocha de soldadura

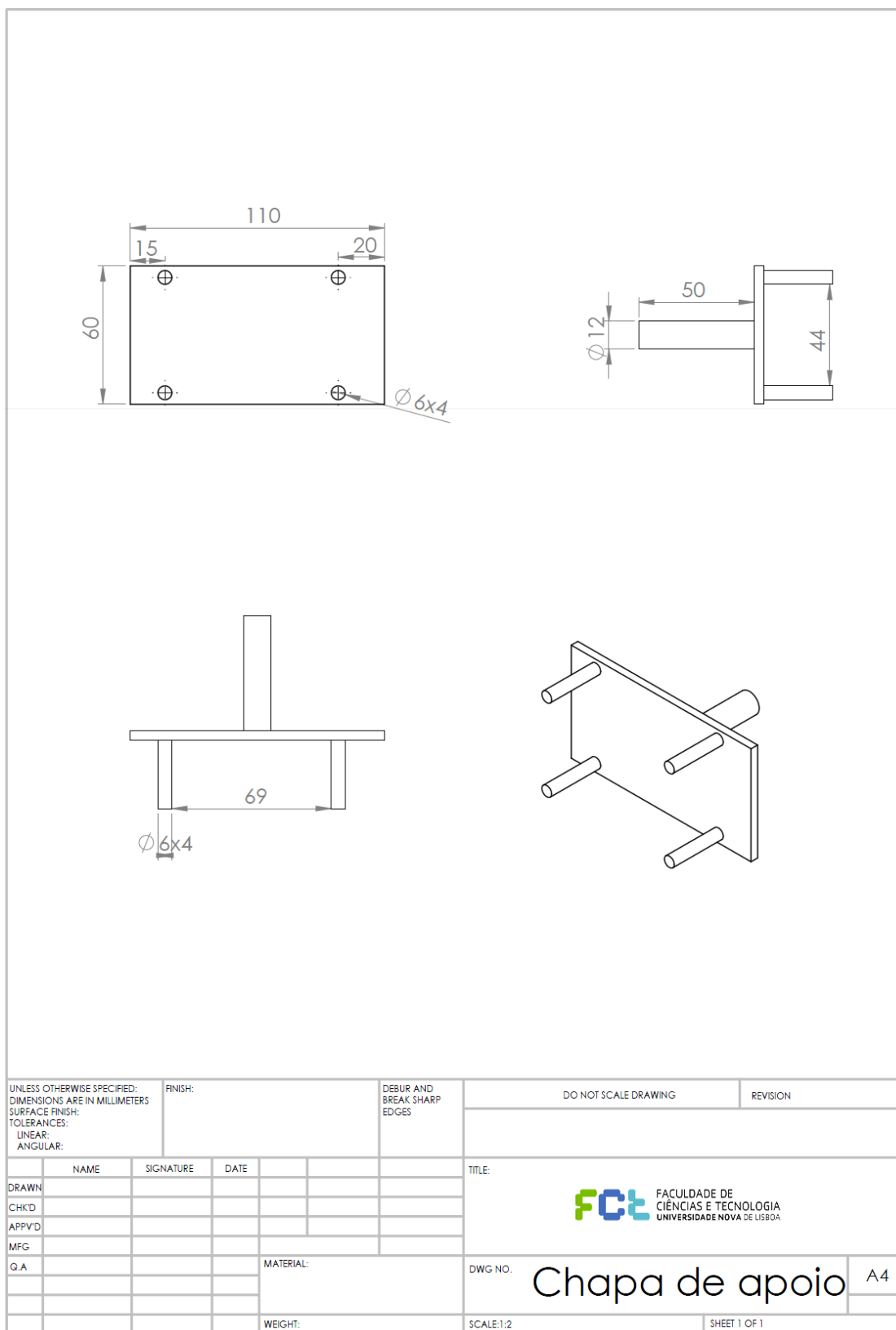


Figura A4: Desenho técnico da chapa de apoio da tocha de soldadura

A1.5 Anilha com saliência e barra de fixação da tocha de soldadura

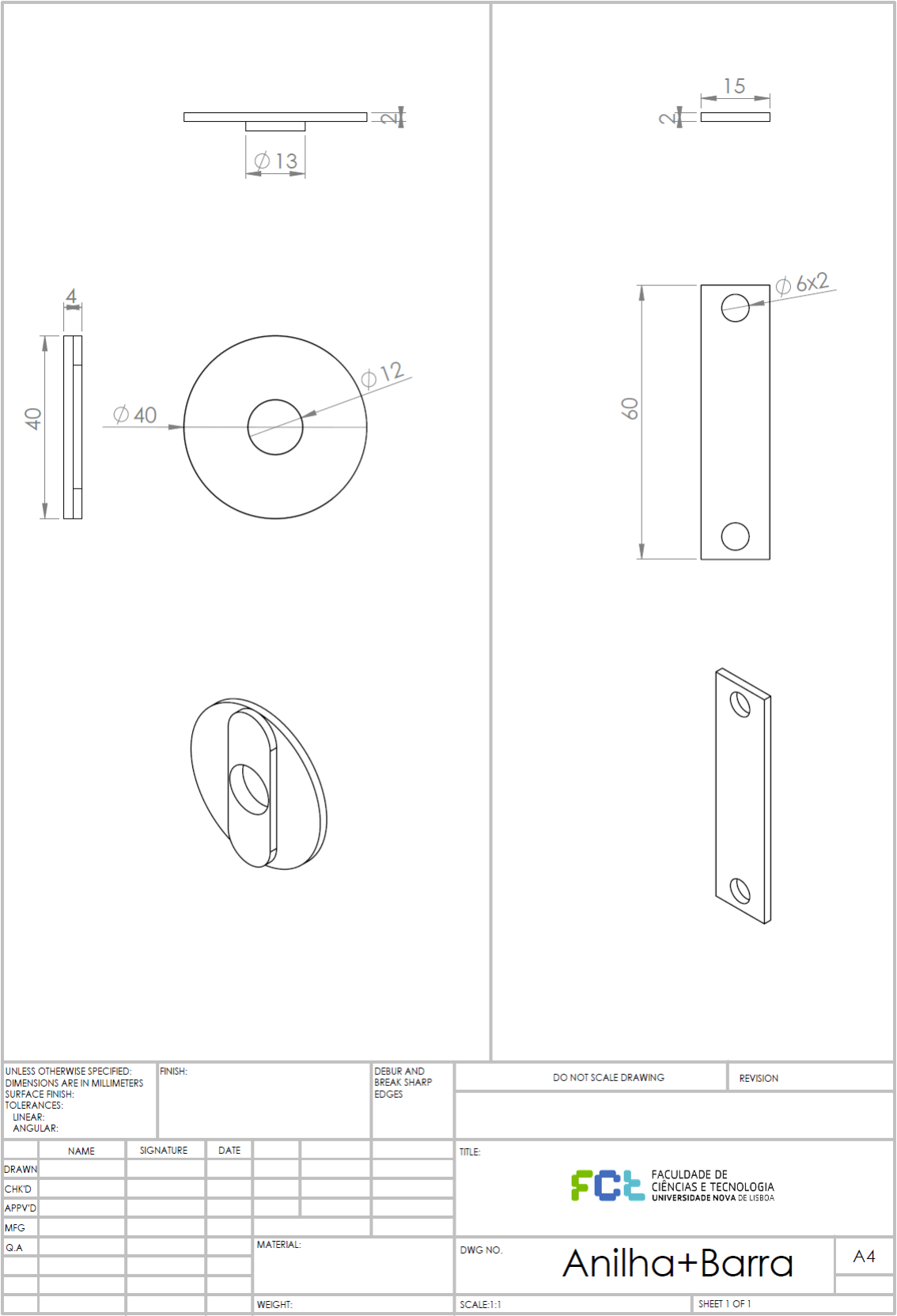


Figura A5: Desenhos técnicos de anilha e barra de fixação da tocha de soldadura

A2. Manual de utilização da mesa de soldar

A2.1 Introdução

A mesa de soldar, foi construída de modo a poder realizar cordões de soldadura no processo de soldadura MIG/MAG com a máquina de soldar ProMig 501 da Kemppi.

As principais características da mesa, são:

- Controlo automático de velocidade de soldadura
- Controlo do comprimento do arco eléctrico
- Controlo da posição da Tocha;
- Custo de construção e manutenção reduzido

A2.2 Lista de componentes

- Cabo de ligação à do relé máquina de soldar
- Cabo de ligação à mesa de soldar
- Controlador de motor P402A *Microstepping Motor drive*
- Fonte de alimentação 24 V
- Fonte de alimentação 4.8 V
- Mesa de soldadura MIG/MAG
- NI *CompactDAQ 9178*
- NI *High-Speed Bidirectional Digital I/O Module 9401*
- NI *Sourcing Digital Output Module 9474*

A2.3 Preparação dos componentes

As ligações entre todos os componentes são ilustradas e explicadas abaixo

A figura A6 ilustra o chassi, cDAQ, onde se ligam os dois módulos da NI.

Os módulos NI 9474 e o módulo NI 9401, devem ser ligados, nas portas 1 e 2, respectivamente.

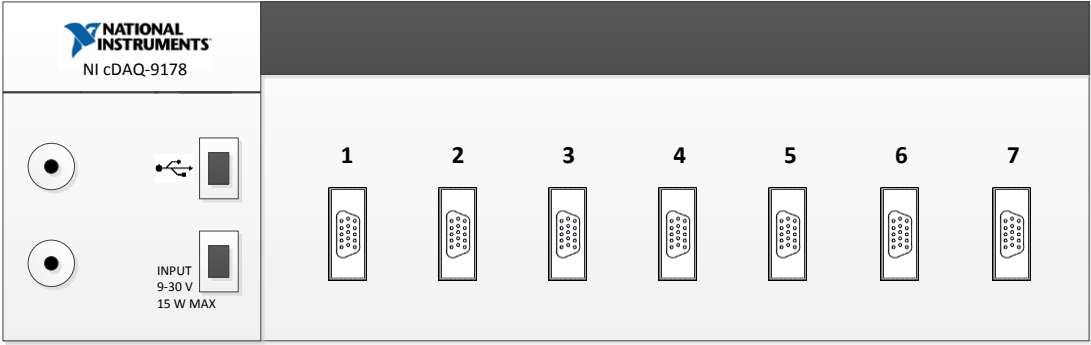


Figura A6: Ilustração de cDAQ-9178

Na figura A7, observa-se uma ilustração do módulo NI 9474. As ligações entre o módulo P402A, o relé, fins de curso e o módulo NI 9474, são realizadas da seguinte forma:

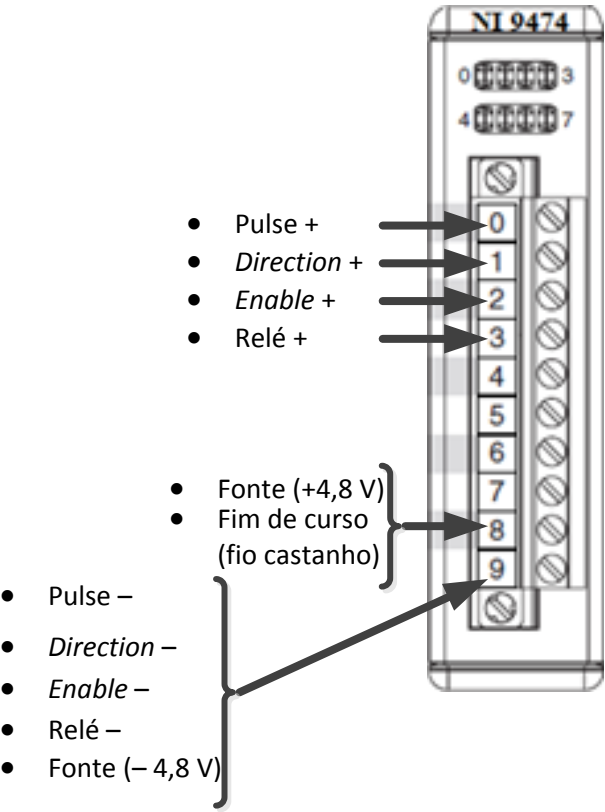


Figura A7: Módulo NI 9474

O módulo 9401, ilustrado na figura A8, realiza o controlo dos fins de curso com ligações do seguinte modo:

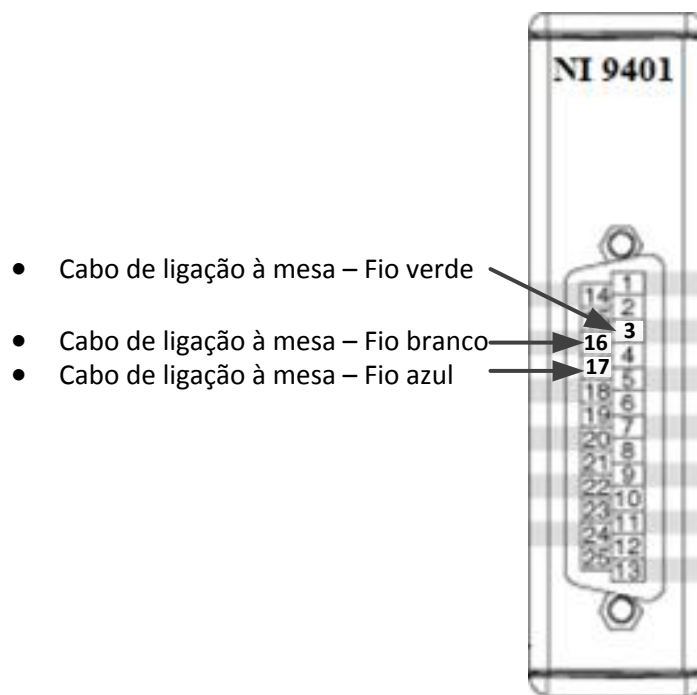


Figura A8: Módulo 9401

O módulo de controlo do motor P402A, representado na figura A9, tem ainda as seguintes ligações:

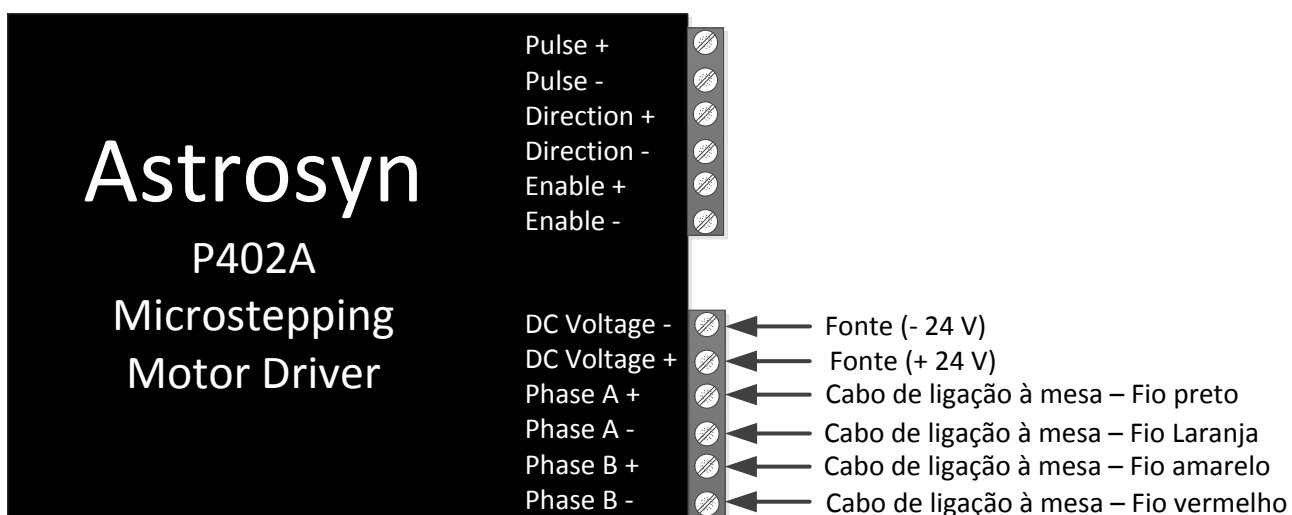


Figura A9: Módulo de controlo do motor

A2.4 Software e interface

O *software* utilizado para o controlo da mesa é o LabView. A figura A10 ilustra o ambiente que aparece quando se inicia o programa de controlo da mesa. O controlo da mesa faz-se da seguinte forma:

- Direcção (tecla de atalho F5), possibilita a selecção da direcção de deslocação da tocha de soldadura.
- Stop (tecla de atalho END), executa a paragem do programa e da mesa de soldadura.
- Frequência, permite o controlo da onda que o programa simula através de impulsos alternados e desta forma a velocidade da tocha de soldadura.
- Relé (tecla de atalho F12), acciona ou desactiva a soldadura.
- *Disable* (tecla de atalho F1), desliga o motor.
- Distancia, é o campo onde se introduz a distância de deslocamento/soldadura pretendida.
- Ciclos, mostra o número de ciclos que o programa tem que realizar, para a tocha de soldadura, percorrer a distância introduzida.
- *Numeric*, contador do número de ciclos em tempo real.
- Tempo, indica o tempo de soldadura.
- Velocidade, indica a velocidade com que a tocha se deslocou/soldou.
- Freq. Efect.¹, indica a frequência real que esta a ser gerada.

¹ A frequência efectiva vai ser influenciada pela capacidade de processamento do computador que estiver a correr o programa.



Figura A10: Ambiente do interface do controlo da mesa

A2.5 Colocação da tocha na máquina de soldar

A tocha de soldadura deve ser colocada no seu suporte na posição ilustrada pela figura A11.

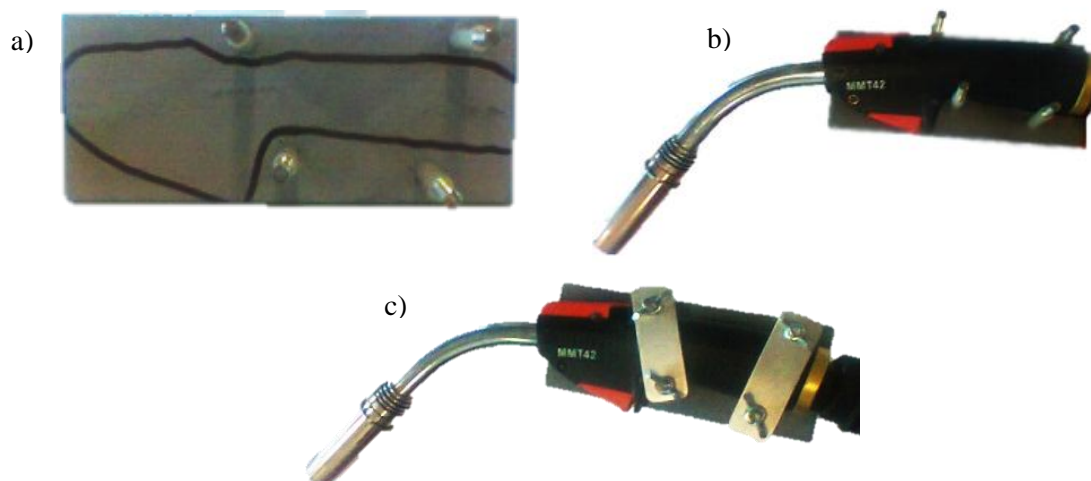


Figura A11: Montagem da tocha de soldadura no suporte

a) Suporte da tocha, b) Colocação da tocha no suporte, c) Fixação da tocha ao suporte.